

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 1

**Тула
Издательство ТулГУ
2025**

Председатель

Кравченко О.А., д-р техн. наук.

Первый заместитель председателя

Воротилин М.С., д-р техн. наук.

Заместитель председателя

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

Ответственный секретарь

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

Члены редакционного совета:

Батанина И.А., д-р полит. наук –

гл. редактор серии «Гуманитарные науки»;

Берестнев М.А., канд. юрид. наук –

гл. редактор серии «Экономические и юридические науки»;

Ларин С.Н., 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

Ларин С.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Заместитель главного редактора

Анцев А.В., 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 В.Ю., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Бабкин А.С., д-р техн. наук (ЛПТУ, г. Липецк);

Бабкин 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);

Вартаков 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);

Григач 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);

Запонец Я., д-р техн. наук (Технический университет Острavy,

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 (ЛПТУ), г. Липецк);

Мозжечков В.А., д-р техн. наук (АО «Тулаэлектромпривод»,

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);

Сычуглов 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).

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 531.383

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-3-4

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГИРОВЕРТИКАЛИ

Д.М. Малютин

В работе приведены результаты исследования погрешностей малогабаритной гировертикали на микромеханических чувствительных элементах. Рассмотрены погрешности, обусловленные возмущающими моментами при качке основания, линейными ускорениями, шумом в выходных сигналах чувствительных элементов. Предложено структурное решение, обеспечивающее уменьшение погрешностей прибора.

Ключевые слова: гировертикаль, погрешность, микромеханические чувствительные элементы.

Гиросtabilизаторы (ГС) широко применяются в информационно - измерительных и управляющих системах на подвижных объектах (ПО). Двухосные ГС в режиме гировертикали (ГВ) решают задачу построения местной вертикали на борту ПО и используются для получения сигналов, пропорциональных угловым отклонениям ПО. Кроме того, ГВ используются для стабилизации полезной нагрузки в плоскости горизонта [1, 2].

Развитие микросистемной техники, в частности, появление микромеханических акселерометров (ММА) и гироскопов (ММГ) [3] позволяет создавать на их основе системы, обладающие малыми массой и габаритами. Однако в этом случае необходима разработка структурных, аппаратных и программных решений, обеспечивающих надлежащую точность системы.

Математическая модель. Математическая модель двухосного малогабаритного ГС в режиме гировертикали представлена в работе [4]. На основании математической модели могут быть составлены структурные схемы и передаточные функции ГВ на микромеханических чувствительных элементах (ММЧЭ) по каналам наружной рамки и платформы. Передаточные функции по каналу платформы отличаются от передаточных функций канала наружной рамки номиналами параметров и тем, что $\cos \varphi_{zo} = 1$. φ_{zo} – угол поворота платформы относительно наружной рамки. Структурная

схема ГВ на ММЧЭ по каналу наружной рамки представлена на рис.1. На структурной схеме K_{ym1} – коэффициент передачи усилителя контура стабилизации, K_{ds1} – коэффициент передачи двигателя стабилизации (датчика момента), p – оператор дифференцирования, $T_{ds1}(p)$ – электромагнитная постоянная времени датчика момента; K_{dys1} – коэффициент передачи ММГ канала наружной рамки, $U_{dys01}(p)$ – смещение нуля ММГ, $U_{y1}(p)$ – сигнал управления, K_{y1} – коэффициент передачи усилителя контура коррекции, $W_1(p)$ – проекция линейного ускорения ПО на ось чувствительности акселерометра канала наружной рамки, $K_{a1}(p)$ – коэффициент передачи ММА, $U_{a01}(p)$ – смещение нуля ММА, J_{ny} – момент инерции по каналу наружной рамки, b_1 – коэффициент сил вязкого трения, T_{dys1} – постоянная времени ММГ.

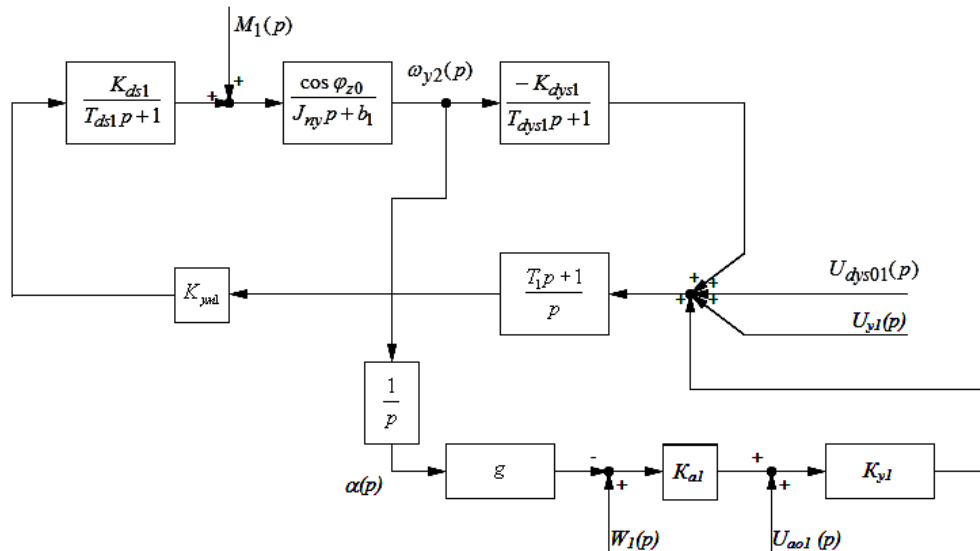


Рис. 1. Структурная схема ГВ на ММЧЭ по каналу наружной рамки

По контуру стабилизации канала наружной рамки передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$W_{p.c.n.p.} = \frac{K_{dys1} K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} (T_1 p + 1)}{(T_{ds1} p + 1)(J_{ny} p + 1)(T_{dys1} p + 1)}. \quad (1)$$

По контуру стабилизации канала наружной рамки передаточная функция замкнутой системы, представляющая отношение погрешности стабилизации $\alpha(p)$ к возмущающему моменту $M_1(p)$ при разомкнутом контуре коррекции имеет вид

$$W_{з.с.н.р.}(p) = \frac{(T_{ds1} p + 1)(T_{dys1} p + 1) K_{106иц}}{A_1 p^4 + B_1 p^3 + C_1 p^2 + D_1 p + 1}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned}
 A_1 &= T_{ds1} J_{ny} T_{dys1} / \cos \varphi_{z0} K_{dys1} K_{ym1} K_{ds1}, \\
 B_1 &= (T_{ds1} J_{ny} + b_1 T_{dys1} T_{ds1} + J_{ny} T_{dys1}) / \cos \varphi_{z0} K_{dys1} K_{ym1} K_{ds1}, \\
 C_1 &= (b_1 T_{ds1} + J_{ny} + b_1 T_{dys1}) / \cos \varphi_{z0} K_{dys1} K_{ym1} K_{ds1}, \\
 B_1 &= (T_{ds1} J_{ny} + b_1 T_{dys1} T_{ds1} + J_{ny} T_{dys1}) / \cos \varphi_{z0} K_{dys1} K_{ym1} K_{ds1}, \\
 D_1 &= (b_1 + K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1} K_{ym1} T_1) / \cos \varphi_{z0} K_{dys1} K_{ym1} K_{ds1}, \\
 K_{1общ} &= 1 / K_{dys1} K_{ym1} K_{ds1}.
 \end{aligned}$$

Составим передаточные функции по контуру управления канала наружной рамки. С этой целью предварительно найдем передаточную функцию замкнутой системы

$$\begin{aligned}
 \frac{\omega_{y2}(p)}{U_{y1}(p)} &= \frac{(T_1 p + 1) K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0}}{(T_{ds1} p + 1)(J_{ny} p + b_1) p} = \\
 &= \frac{1}{1 + \frac{(T_1 p + 1) K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1}}{(T_{ds1} + 1)(J_{ny} p + b_1)(T_{dys1} p + 1) p}} \\
 &= \frac{K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} (T_1 p + 1)(T_{dys1} p + 1)}{(b_1 + K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1})} \\
 &= \frac{A_3 p^3 + B_3 p^2 + C_3 p + 1}{A_3 p^3 + B_3 p^2 + C_3 p + 1}
 \end{aligned} \tag{3}$$

где

$$\begin{aligned}
 A_3 &= T_{ds1} J_{ny} T_{dys1} / (b_1 + K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1}), \\
 B_3 &= (J_{ny} T_{ds1} + b_1 T_{dys1} T_{ds1} + J_{ny} T_{dys1}) / (b_1 + K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1}), \\
 C_3 &= (b_1 T_{ds1} + J_{ny} + b_1 T_{dys1} + T_1 K_{ym1} + K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1}) / \\
 &\quad / (b_1 + K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1}) \\
 K_{3общ} &= K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} / (b_1 + K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1}).
 \end{aligned}$$

С учетом полученных выражений передаточная функция разомкнутой системы по каналу управления наружной рамки имеет вид

$$W_{p.c.n.p.y}(p) = \frac{K_{3общ} (T_1 p + 1)(T_{dys1} p + 1) g K_{a1} K_1}{(A_3 p^3 + B_3 p^2 + C_3 p + 1) p}. \tag{4}$$

Передаточная функция замкнутой системы по каналу управления наружной рамки имеет вид

$$\begin{aligned}
 \frac{\alpha(p)}{U_{y1}(p)} &= \frac{K_{3общ} (T_1 p + 1)(T_{dys1} p + 1)}{(A_3 p^3 + B_3 p^2 + C_3 p + 1) p} = \\
 &= \frac{1}{1 + \frac{K_{3общ} (T_1 p + 1)(T_{dys1} p + 1) g K_{a1} K_1}{(A_3 p^3 + B_3 p^2 + C_3 p + 1) p}}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Полученные передаточные функции могут быть упрощены. С этой целью, пренебрегая малыми постоянными времени T_{dys1}, T_{ds1} запишем передаточную функцию замкнутой системы

$$\begin{aligned}
 \frac{\omega_{y2}(p)}{U_{y1}(p)} &= \frac{\frac{(T_1 p + 1) K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0}}{(J_{ny1} p + b_1) p}}{1 + \frac{(T_1 p + 1) K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1}}{(J_{ny} p + b_1) p}} = \\
 &= \frac{K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} (T_1 p + 1)}{J_{ny} p^2 + p(T_1 K_{ym1} K_{ds1} K_{dys1} \cos \varphi_{z0} + b_1) + K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1}} = \\
 &= \frac{K_{5общ} \cos \varphi_{z0} (T_1 p + 1)}{T_5^2 p^2 + 2\xi_5 T_5 p + 1},
 \end{aligned} \quad (6)$$

где $K_{5общ} = 1 / K_{dys1}$, $T_5 = \sqrt{J_{ny} / K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1}}$,

$$\xi_5 = \frac{(T_1 K_{ym1} K_{ds1} K_{dys1} \cos \varphi_{z0} + b_1)}{2\sqrt{J_{ny} K_{ym1} K_{ds1} \cos \varphi_{z0} K_{dys1}}}.$$

В полученных передаточных функциях величины T_5 , T_1 , являются малыми, поэтому при анализе контуров управления и коррекции с собственной постоянной времени порядка 1-10 с передаточные функции могут быть представлены в виде

$$\frac{\omega_{y2}(p)}{U_{y1}(p)} \approx \frac{\cos \varphi_{z0}}{K_{dys1}}. \quad (7)$$

С учетом полученных выражений передаточная функция разомкнутой системы по каналу управления наружной рамки имеет вид

$$W_{p.c.n.p.y}(p) = \frac{gK_{a1}K_1 \cos \varphi_{z0}}{K_{dys1}p}. \quad (8)$$

Передаточная функция замкнутой системы по каналу управления наружной рамки имеет вид

$$\frac{\alpha(p)}{U_{y1}(p)} = \frac{\frac{\cos \varphi_{z0}}{K_{dys1}p}}{1 + \frac{gK_{a1}K_{y1} \cos \varphi_{z0}}{K_{dys1}p}} = \frac{K_{7общ}}{T_7 p + 1} \quad (9)$$

где $K_{7общ} = 1 / gK_a K_{y1}$, $T_7 = K_{dys1} / gK_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0}$.

Так как точка приложения в системе управляющего воздействия и шума ММГ совпадают, то передаточная функция $\alpha(p)/U_{dys01}(p)$ имеет вид (5) соответственно, а в упрощенной форме записи вид (9) соответственно.

Запишем передаточные функции, описывающие функционирование контура коррекции ГВ при замкнутом контуре стабилизации.

Передаточная функция замкнутой системы по каналу наружной рамки

$$\frac{\alpha(p)}{W_1(p)} = \frac{\frac{K_{3общ}(T_1p+1)(T_{dys1}p+1)K_{a1}K_{y1}}{(A_3p^3+B_3p^2+C_3p+1)p}}{1+\frac{K_{3общ}(T_1p+1)(T_{dys1}p+1)gK_{a1}K_{y1}}{(A_3p^3+B_3p^2+C_3p+1)p}}. \quad (10)$$

С учетом выражения (7)

$$\frac{\alpha(p)}{W_1(p)} = \frac{\frac{K_{a1}K_{y1} \cos \varphi_{z0}}{K_{dys1}}}{1+\frac{gK_{a1}K_{y1} \cos \varphi_{z0}}{K_{dys1}p}} = \frac{K_{9общ}}{T_9p+1}, \quad (11)$$

где $K_{9общ} = 1/g$, $T_{9общ} = K_{dys1}/gK_{a1}K_{y1} \cos \varphi_{z0}$.

Составим передаточные замкнутых контуров стабилизации ГВ с учетом замкнутых контуров коррекции. Найдем передаточную функцию элемента структурной схемы, изображенной на рис.1 на участке цепи от входа передаточной функции, описывающей динамику ММГ до точки приложения управляющего воздействия

$$\frac{K_{dys1}}{T_{dys1}p+1} + \frac{gK_{a1}K_{y1}}{p} = \frac{(T_{10}p+1)K_{10общ}}{(T_{dys1}p+1)p},$$

тогда искомая передаточная функция по каналу наружной рамки запишется

$$W_{з.с.н.р}(p) = \frac{\alpha(p)}{M_1(p)} = \frac{(T_{ds1}p+1)(T_{dys1}p+1) \cos \varphi_{z0} p}{(J_{ny}p+1)(T_{ds}p+1)(T_{dys1}p+1)p^2 + (T_{10}p+1)(T_1p+1)K_{10общ}K_{ym1}K_{ds1} \cos \varphi_{z0}}, \quad (12)$$

где $T_{10} = (K_{dys1} + T_{dys1}g \sin \alpha_0 K_{a1}K_{y1})/g \sin \alpha_0 K_{a1}K_{y1}$, $K_{10общ} = gK_{a1}K_{y1}$.

Передаточная функция, связывающие шум на выходе ММА и погрешность стабилизации, имеет вид

$$\frac{\alpha(p)}{U_{a01}(p)} = \frac{K_{12общ}}{T_{12}p+1}, \quad (12)$$

где $K_{12общ} = 1/gK_{a1}$, $T_{12} = K_{dys1}/gK_{a1}K_{y1} \cos \varphi_{z0}$.

Результаты исследования погрешностей гировертикали. Рассмотрим следующий численный пример, описывающий функционирование ГВ массой 0,8кг. При $T_1 = 0,01$ с, $K_{y1}K_{ds1}K_{dys1} = 26$ Нмс/рад контур стабилизации устойчив, значение ЛАЧХ замкнутого контура стабилизации в полосе пропускания составляет -30 дБ. При значении $K_{y1} = 0,16$, $K_{dys1} = 0,34$ Вс/рад контура коррекции ГВ устойчивы и имеют постоянные времени равные 3,4с. Рассмотрим поведение ГВ при замкнутых контурах стабилизации и коррекции, обусловленное шумами в выходных сигналах ММГ и ММА.

Оценим среднеквадратическое отклонение (СКО) погрешности стабилизации с использованием соотношения, связывающего спектральную плотность на выходе системы $S_{\text{вых}}(\omega)$ со спектральной плотностью на ее входе $S_{\text{вх}}(\omega)$: $S_{\text{вых}}(\omega) = |W_3(p)|^2 S_{\text{вх}}(\omega)$. В этом случае СКО погрешности стабилизации может быть определено с использованием зависимости $\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_3(p)|^2 S_{\text{вх}}(\omega) d(\omega)}$. Если в ГС применен ММГ, на выходе которого присутствует белый шум со случайным блужданием ARW , то в соответствии с (9) с учетом перехода от описания шума как электрической величины к механической, получим

$$\sigma_{\alpha\text{ММГ}} = ARW \sqrt{\frac{\cos \varphi_{z0}}{2gK_{a1}K_{y1}K_{\text{dys1}}}} K_{\text{dys1}}. \quad (15)$$

Если в ГВ применен ММА, на выходе которого присутствует белый шум со случайным блужданием VRW , то в соответствии с (12) с учетом перехода от описания шума как электрической величины к механической, получим

$$\sigma_{\alpha\text{ММА}} = VRW \sqrt{\frac{\cos \varphi_{z0} K_{y1}}{2gK_{a1}K_{\text{dys1}}}} K_{a1}. \quad (17)$$

СКО погрешности стабилизации, обусловленной шумами ММГ и ММА

$$\sigma_{\alpha\text{ММГ,ММА}} = \sqrt{\sigma_{\alpha\text{ММГ}}^2 + \sigma_{\alpha\text{ММА}}^2}$$

Пусть $ARW = 0,0024^0 / \sqrt{c}$, $VRW = 0,001_{\text{м}} / c^2 / \sqrt{c}$, тогда при $\varphi_{z0} = 0^0$, $\sigma_{\alpha\text{ММГ}} = 0,0031^0$, $\sigma_{\alpha\text{ММА}} = 0,0004^0$, $\sigma_{\alpha\text{ММГ,ММА}} = 0,0031^0$. Если рассматривать СКО погрешности стабилизации, обусловленной шумами ММГ и ММА как функцию K_{y1} , то эта величина минимальна при $K_{y1} = (ARW \times K_{\text{dys1}}) / (VRW \times K_{a1}) = 12,55$. Однако значение коэффициента $K_{y1} = 12,55$ в данном расчетном примере является не приемлемым, так как постоянная времени контура коррекции становится в этом случае слишком малой и ГВ в значительной степени подвержена воздействию линейных ускорений. Следует отметить, что при расчетном значении $K_{y1} = 0,16$ преобладает погрешность, обусловленная шумом в выходном сигнале ММГ. График погрешности стабилизации, обусловленной шумами ММГ и ММА, представлен на рис.2.

На рис.3 представлен график погрешностей стабилизации по каналу наружной рамки от воздействия моментов сил вязкого и сухого трения, инерционных моментов, моментов тяжения токоподводов при качке основания с амплитудой 5 град и частотой 2 Гц. Отклонение от вертикали не

превышает $\pm 0,3$ угл.мин. На рис.4 представлен график погрешностей стабилизации по каналу наружной рамки от воздействия линейных ускорений качки основания с амплитудой $0,25 \text{ м/с}^2$ и частотой 2 Гц. Амплитуда погрешности стабилизации в установившемся режиме не превышает ± 2 угл.мин.

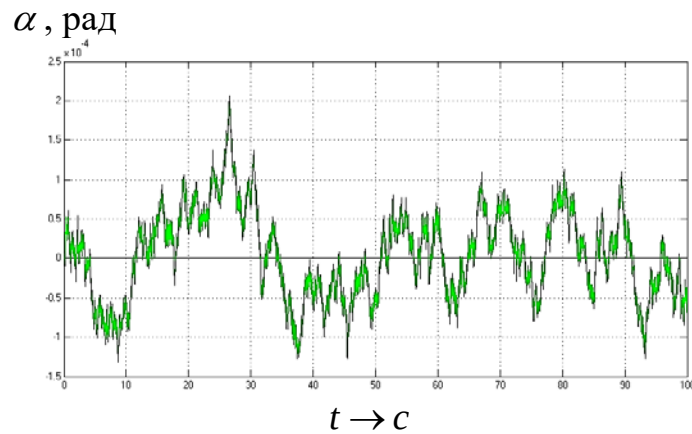


Рис. 2. Погрешность стабилизации

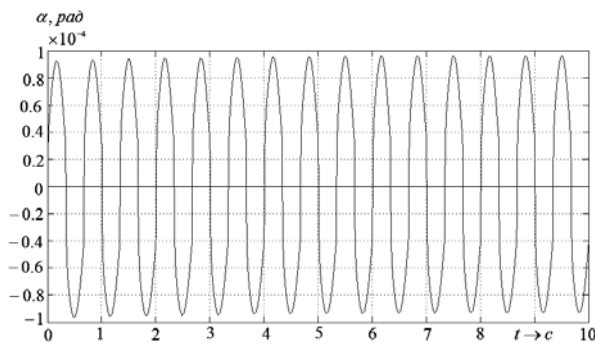


Рис.3. Погрешность стабилизации

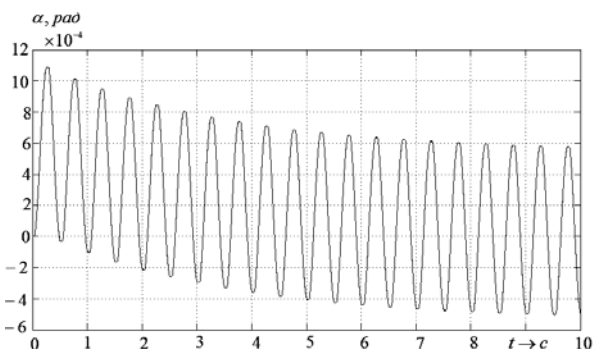


Рис.4. Погрешность стабилизации

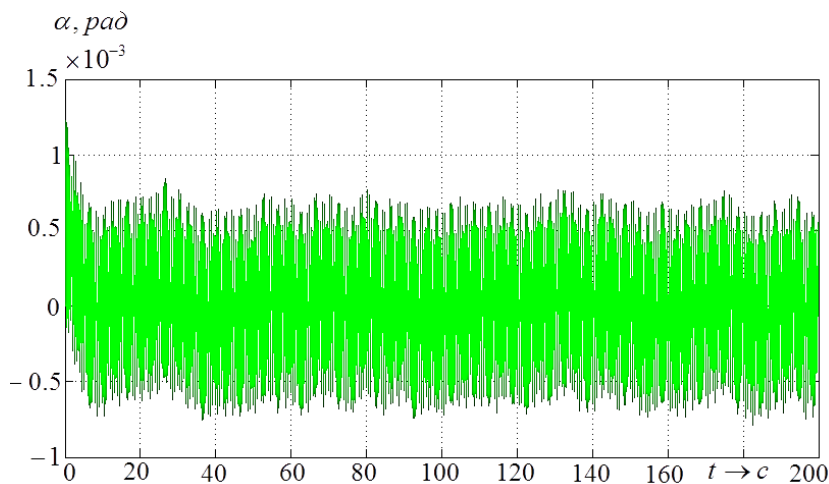


Рис.5. Суммарная погрешность стабилизации

На рис.5 представлен график суммарной погрешности стабилизации по каналу наружной рамки от воздействия моментов вязкого и сухого трения, инерционных моментов, моментов тяжения токоподводов, линейных ускорений качки основания, случайных составляющих в выходных сигналах ММГ и ММА. Отклонение от вертикали не превышает $\pm 2,9$ угл.мин.

Анализ передаточных функций (9), (11) показывает, что для уменьшения погрешностей стабилизации, обусловленных шумом в выходных сигналах ММГ, необходимо увеличить коэффициент передачи по контуру коррекции, но это приводит к уменьшению постоянной времени по контуру коррекции, а следовательно, к существенному возрастанию погрешностей стабилизации от воздействия линейных ускорений движения объекта.

Задача повышения точности ГВ на ММЧЭ может быть решена за счет выбора целесообразной структуры построения системы [5]. С целью повышения точности функционирования ГВ применим схему акселерометрической коррекции, передаточная функция которой представляет собой фильтр Баттерворта третьего порядка.

Структурная схема ГВ со схемой акселерометрической коррекции в виде фильтра Баттерворта третьего порядка может быть реализована, как это показано на рис. 6.

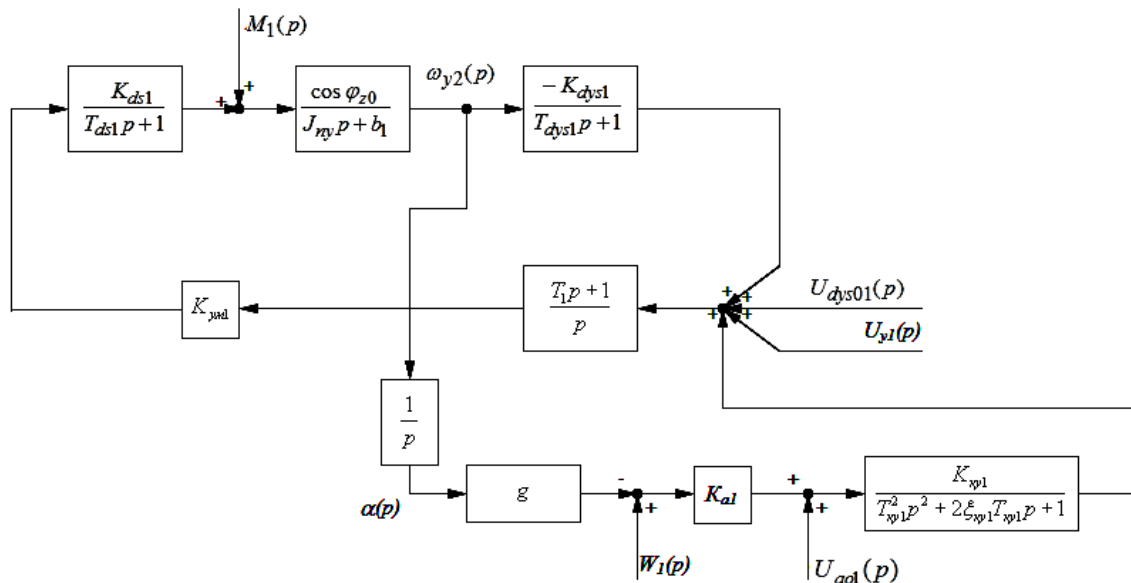


Рис. 6. Структурная схема ГВ (канал наружной рамки)

Если передаточная функция корректирующего устройства контура коррекции равна

$$W_{ky1}(p) = \frac{K_{ky1}}{T_{ky1}^2 p^2 + 2\xi_{ky1} T_{ky1} p + 1}, \quad (18)$$

то передаточная функция замкнутой системы имеет вид (пренебрегая малыми постоянными времени ДУС и ДМ)

$$\frac{\alpha(p)}{W_1(p)} = \frac{\frac{1}{g}}{\frac{T_{ky1}^2 K_{dys1}}{K_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{ky1} g} p^3 + \frac{2\xi_{ky1} T_{ky1} K_{dys1}}{K_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{ky1} g} p^2 + \frac{K_{dys1}}{K_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{ky1} g} p + 1}. \quad (19)$$

Параметры корректирующего устройства следует выбирать исходя из системы уравнений

$$\begin{cases} T_{ky1}^2 = \frac{1}{2\omega_c^2}, \\ \xi_{ky1} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \\ K_{ky1} = \frac{K_{dys1} \omega_c}{2g K_{a1} \cos \varphi_{z0}}. \end{cases} \quad (20)$$

Реализация системы коррекции в виде передаточной функции соответствующей фильтру Баттерворта третьего порядка позволяет получить наклон АФЧХ выше частоты среза системы -60 дБ/дек в отличие от рассмотренной выше структуры системы коррекции, у которой наклон АФЧХ выше частоты среза составляет -20 дБ/дек.

Запишем передаточную функцию системы по управляющему воздействию

$$\frac{\alpha(p)}{U_{y1}(p)} = \frac{\frac{1}{g K_{a1} K_{ky1}} (T_{ky1}^2 p^2 + 2\xi_{ky1} T_{ky1} p + 1)}{\frac{T_{ky1}^2 K_{dys1}}{K_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{ky1} g} p^3 + \frac{2\xi_{ky1} T_{ky1} K_{dys1}}{K_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{ky1} g} p^2 + \frac{K_{dys1}}{K_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{ky1} g} p + 1} \quad (21)$$

Коэффициент передачи по управляющему воздействию

$$k = \frac{1}{g K_{a1} K_{ky1}}.$$

Так как точка приложения управляющего воздействия в системе совпадает с точкой приложения шума ММГ, то соответствующая передаточная функция имеет вид

$$\frac{\alpha(p)}{U_{dys01}(p)} = \frac{\frac{1}{g K_{a1} K_{ky1}} (T_{ky1}^2 p^2 + 2\xi_{ky1} T_{ky1} p + 1)}{\frac{T_{ky1}^2 K_{dys1}}{K_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{ky1} g} p^3 + \frac{2\xi_{ky1} T_{ky1} K_{dys1}}{K_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{ky1} g} p^2 + \frac{K_{dys1}}{K_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{ky1} g} p + 1} \quad (22)$$

Применение структуры акселерометрической коррекции в виде фильтра Баттерворта третьего порядка обеспечивает эффективное ослабление влияния линейных ускорений на погрешность стабилизации ГВ и допускает увеличение коэффициента передачи K_{ky1} , что приводит к уменьшению влияния шума ММГ на погрешность стабилизации ГВ. Например, при частоте среза ГВ $\omega_c = 1,43 \text{ с}^{-1}$ параметры корректирующего устройства в соответствии (20) будут равны: $T_{ky1}^2 = 0,245 \text{ с}^2$, $2\xi_{ky1} T_{ky1} = 0,7$, $K_{ky1} = 0,39$. ЛАФЧХ по передаточной функции (19) представлена на рис. 7.

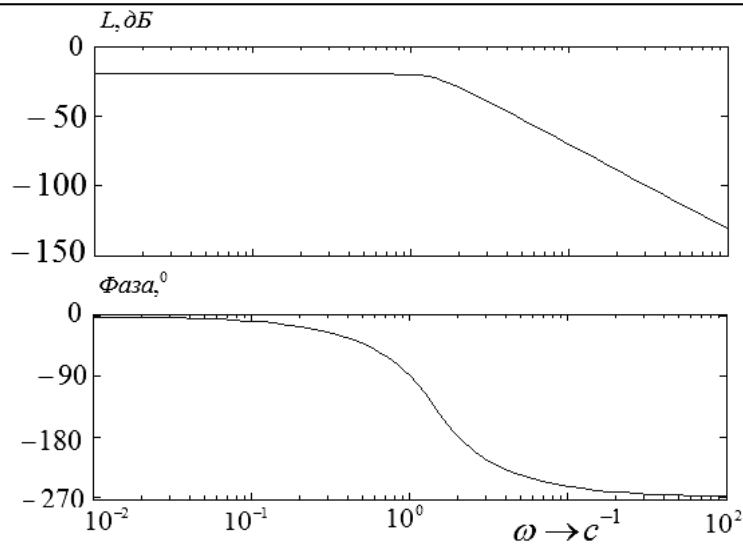


Рис. 7. ЛАФЧХ контура коррекции

В таблице приведены значения ЛАЧХ ГВ с акселерометрической коррекцией в виде фильтра Баттерворта третьего порядка и ГВ с пропорциональным законом акселерометрической коррекции для характерных частот качки основания.

Значения ЛАЧХ ПФ контура коррекции ГВ для различных законов акселерометрической коррекции

Тип закона акселерометрической коррекции	В виде фильтра Баттерворта 3го порядка		С пропорциональным законом управления	
	Значения ЛАЧХ	Коэффициент ослабления (величина обратная значению АЧХ)	Значения ЛАЧХ	Коэффициент ослабления (величина обратная значению АЧХ)
$\omega = 6,28c^{-1}$	-58,6дБ	861	-46,6дБ	213
$\omega = 12,56c^{-1}$	-76,5дБ	6683	-52,7дБ	431

Рассмотрим поведение ГВ при замкнутых контурах стабилизации и коррекции, обусловленное шумами в выходных сигналах ММГ и ММА. Если в ГВ применен ММГ, на выходе которого присутствует белый шум со случайным блужданием ARW , то в соответствии с (22) с учетом перехода от описания шума как электрической величины к механической, получим

$$\sigma_{\alpha ММГ} = ARW \cos \varphi_{z0} K_{dys1} \times \sqrt{\frac{(4T_{ky1}^2 \xi^2 - 2T_{ky1}^2) T_{ky1}^2 K_{dys1}^2 g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0} - T_{ky1}^4 K_{dys1}^2 g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0} - T_{ky1}^2 K_{dys1}^2 2\xi T_{ky1} K_{dys1}}{2T_{ky1}^2 K_{dys1}^2 g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0} (T_{ky1}^2 K_{dys1}^2 g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0} - 2\xi T_{ky1} K_{dys1}^2)}}} \quad (23)$$

Если в ГВ применен ММА, на выходе которого присутствует белый шум со случайным блужданием VRW , то в соответствии с (19)

$$\sigma_{\alpha MMA} = VRW \cos \varphi_{z0} K_{y1} \times \sqrt{\frac{T_{\kappa y1}^2 K_{dys1} 2\xi T_{\kappa y1} K_{dys1}}{2T_{\kappa y1}^2 K_{dys1} g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0} (2\xi T_{\kappa y1} K_{dys1}^2 - T_{\kappa y1}^2 K_{dys1} g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0})}}. \quad (24)$$

СКО погрешности стабилизации, обусловленной шумами ММГ и ММА

$$\sigma_{\alpha MMG, MMA} = \sqrt{\sigma_{\alpha MMG}^2 + \sigma_{\alpha MMA}^2}. \quad (24)$$

Пусть $ARW = 0,0024^0 / \sqrt{c}$, $VRW = 0,001_M / c^2 / \sqrt{c}$, тогда при $\varphi_{z0} = 0^0$, $\sigma_{\alpha MMG} = 0,002584^0$, $\sigma_{\alpha MMA} = 0,0011^0$, $\sigma_{\alpha MMG, MMA} = 0,0028^0$.

На рис. 8 представлен график суммарной погрешности стабилизации по каналам наружной рамки и платформы от воздействия моментов сил вязкого и сухого трения, инерционных моментов, моментов тяжения токоподводов, линейных ускорений качки основания, случайных составляющих в выходных сигналах ММГ и ММА, полученный путем численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений [4], описывающей динамику системы. Погрешность стабилизации не превышает $\pm 0,69$ угл. мин. Амплитуда составляющей погрешности от воздействия моментов сил вязкого и сухого трения, инерционных моментов, моментов тяжения токоподводов. составляет $\pm 0,6$ угл. мин. Амплитуда составляющей погрешности стабилизации от воздействия линейных ускорений качки основания в этом случае пренебрежимо мала и составляет $\pm 1,5$ угл. сек.

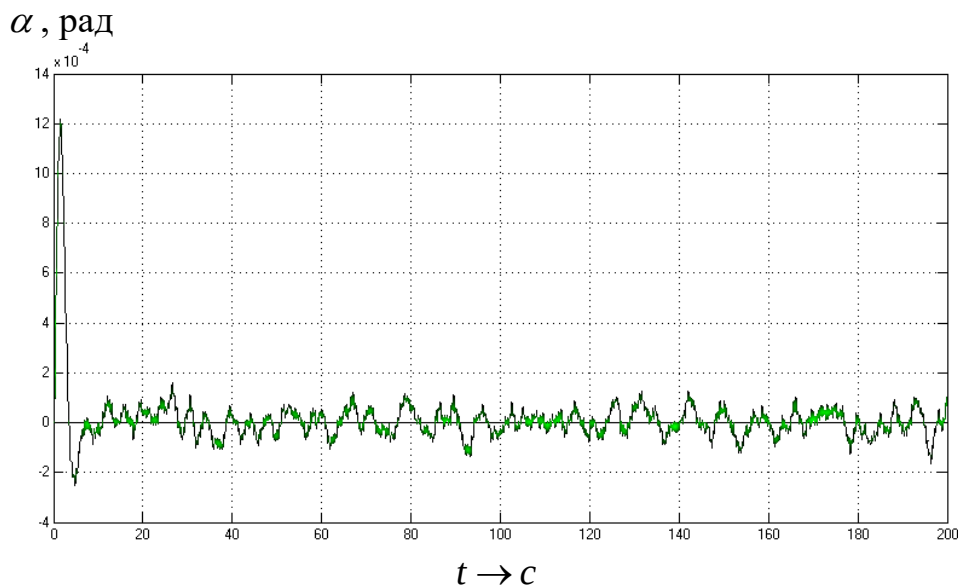


Рис. 8. Погрешность стабилизации

Итоговая погрешность стабилизации уменьшена в 4,2 раза по сравнению со структурой акселерометрической коррекции с пропорциональным законом управления за счет уменьшения составляющих погрешности стабилизации, обусловленных линейными ускорениями качки основания и шумами в выходных сигналах ММГ и ММА.

Заключение. В работе рассмотрена схема построения гировертикали с изодромным звеном в контуре стабилизации и пропорциональным законом в контуре акселерометрической коррекции. Получены аналитические выражения для расчета погрешностей прибора, обусловленных шумом в сигналах чувствительных элементов. Проведена оценка погрешностей от возмущающих моментов при качке основания и линейных ускорений качки подвижного объекта. С целью увеличения точности работы предложена схема построения гировертикали с изодромным звеном в контуре стабилизации и контуром акселерометрической коррекции в виде фильтра Баттерворта третьего порядка. Для этой схемы так же получены аналитические выражения для расчета погрешностей прибора, обусловленных шумом в сигналах чувствительных элементов. Проведена оценка погрешностей от возмущающих моментов при качке основания и линейных ускорений качки подвижного объекта. Суммарная погрешность гировертикали с изодромным звеном в контуре стабилизации и контуром акселерометрической коррекции в виде фильтра Баттерворта третьего порядка уменьшена более, чем в четыре раза по сравнению с исходной схемой построения прибора.

Список литературы

1. Малютин Д.М., Коржук Н.Л., Лыгин В.А., Мирошниченко И.В., Пироженко И.В., Ларин И.И. Система коррекции гиростабилизатора морского гравиметра. Патент RU 2244261 С1, 10.01.2005. Заявка № 2003119060/28 от 24.06.2003.
2. Малютин Д.М. Комбинированная двухосная гировертикаль // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 3. С. 6-10.
3. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.
4. Malyutin D.M. Miniature gyroscopic orientation system for unmanned aerial vehicle // В сборнике: 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2018. Proceedings. 2018. С. 1-4.
5. Малютин Д.М. Двухосный индикаторный гиростабилизатор. Патент RU 2 764744 С1, 20.01.2022. Заявка № 2021112609, 28.04.2021.

Малютин Дмитрий Михайлович, канд. техн. наук, профессор, Malyutindm@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

D.M. Malyutin

The paper presents the results of a study of the errors of a small-sized gyro on micro-mechanical sensing elements. The errors caused by disturbing moments during the pitching of the base, linear accelerations, and noise in the output signals of the sensing elements are considered. A structural solution is proposed to reduce the errors of the device.

Key words: gyrovertical, error, micromechanical sensing elements.

Malyutin Dmitriy Mikhailovich, candidate technical sciences, professor, Mal-yutindm@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.722

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-15-16

МЕТОДИКА РАБОТЫ ДОЛЖНОСТНЫХ ЛИЦ ПО СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

А.Ю.Савицкий

Исследование посвящено применению технологии цифровых двойников. И традиционных методов планирования, основывающихся на логических структурах сетей передачи данных, Внедрение цифровых двойников в процесс планирования и постановки задач для обеспечения связи значительно увеличивает эффективность этих процессов, сокращая время подготовки телекоммуникационного оборудования более чем в 20 раз и уменьшая вероятность ошибок при настройке благодаря тестированию в имитационной модели. Научная новизна исследования заключается в разработке инновационной методики работы должностных лиц по связи, основанной на использовании технологии цифровых двойников. Этот подход представляет собой новый способ оптимизации управления и существенно улучшает планирование и постановку задач на обеспечение связи.

Ключевые слова: система управления связи, организационное управление, оперативно-техническое управление, технологическое управление, планирование.

Исследование того, как войска связи выполняют свои задачи, и анализ методов, которые использует противник, показали, что планирование системы связи, особенно в полевых условиях, - это постоянный процесс. Он происходит на протяжении всей работы пунктов управления (ПУ). Поскольку оперативные группы ПУ часто перемещаются в зоне боевых действий, органам управления связью приходится постоянно корректировать сеть передачи данных в режиме реального времени [1]. Это нужно, чтобы система связи могла адаптироваться к изменениям в физической и логической структуре в зависимости от текущей ситуации. Благодаря такой адаптации сеть может выполнять требования по оперативности и качеству передачи информации с минимальными затратами времени. Должностные лица постоянно обеспечивают связь на протяжении всей работы ПУ. Кроме того,

исследования, показывают, что системы связи специального назначения должны быть готовы к дестабилизирующим воздействиям, таким как огневое поражение и радиоэлектронное подавление. Это подчёркивает важность гибкости и устойчивости систем связи в условиях боевых действий.

Организация управления. Планирование и постановка задач на обеспечение связи. Одним из ключевых компонентов системы связи является её система управления [2]. Она объединяет органы, пункты и средства управления, которые связаны между собой на организационном, оперативно-техническом и технологическом уровнях (рис.1) [1].

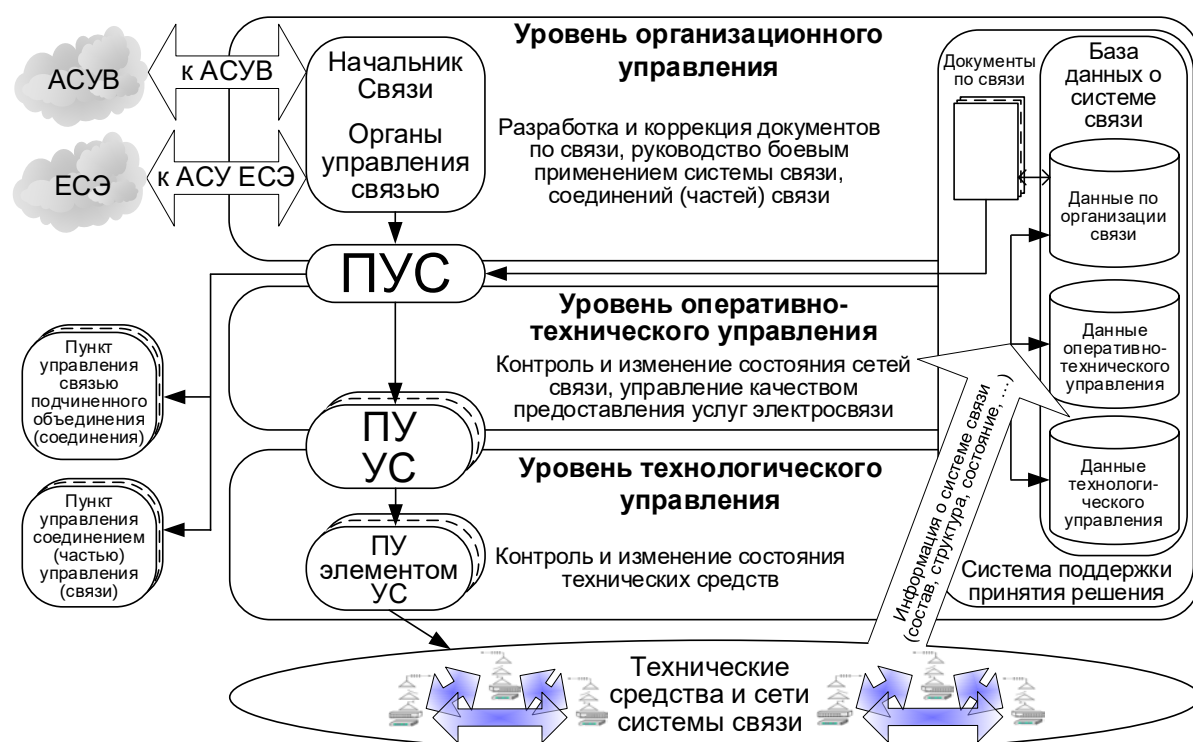


Рис.1. Структуры системы управления связи

Система связи (СС) играет ключевую роль в любой системе управления, обеспечивая обмен информацией между различными элементами этой системы. Один из важнейших аспектов управления связью - это планирование связи. На его основе ставятся задачи подчинённым для выполнения поставленных целей. В настоящее время особенно сложной задачей является настройка телекоммуникационного оборудования, поскольку для каждого устройства требуется разработать свой комплект данных по связи.

Кроме того, для обеспечения эффективного функционирования необходимо планировать не только физическую связность оборудования, но и логические структуры создаваемых сетей связи.

В соответствии с [2] и организацией процессов управления связью, при планировании и постановке задач на обеспечение связи можно выделить три уровня модели системы управления СС (рис.2), каждый из которых решает определённые задачи.

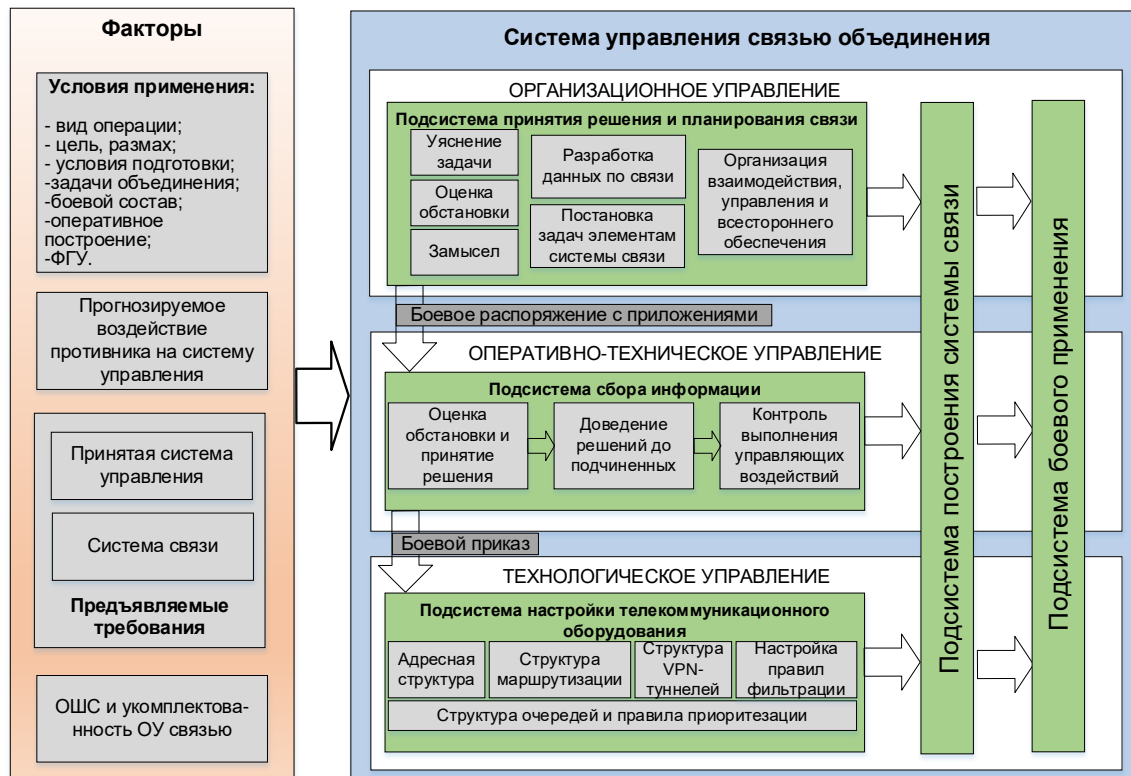


Рис.2. Модель системы управления связью

Традиционный метод планирования включает в себя несколько этапов:

На организационном уровне начальник связи определяет общую структуру сетей передачи данных связи и ставит задачу подчинённым в виде боевого распоряжения с приложениями.

На организационно-техническом уровне командир воинской части связи и штаб, получив боевое распоряжение, детализируют задачу, разрабатывая общую схему-приказ на узлы связи с приложениями. Командир подразделения готовит схемы-приказы на боевые посты.

На технологическом уровне механик аппаратной связи, используя полученные схемы-приказы и технологические карты, настраивает телекоммуникационное оборудование.

Настройка оборудования в соответствии с запланированными логическими структурами критически важна для эффективной работы системы связи [3]. Логические структуры служат основой для организации и управления потоками данных, ресурсами и функциями системы, позволяя разделить её на отдельные модули, каждый из которых выполняет определённые задачи. Это упрощает управление, поддержку и модернизацию системы.

Разработка логических структур для сетей связи и комплектов данных по связи для узлов связи и телекоммуникационного оборудования остаётся сложной задачей [4].

Создание документов оперативно-технической службы, например схем-приказов, требует значительных временных затрат и привлечения

большого количества специалистов. Это затрудняет эффективное использование возможностей оборудования и обеспечение высокого качества услуг связи для должностных лиц.

Технология цифровых двойников может помочь решить эти проблемы [5,6]. Она позволяет создать виртуальную модель сети передачи данных, которая соответствует реальной системе связи. Это помогает точно и комплексно настроить телекоммуникационное оборудование.

Результаты моделирования, полученные с использованием программных образов реального телекоммуникационного оборудования, установленного в аппаратных связях, были проверены на соответствие действительности с помощью теста Шапиро–Уилка. (рис.3)

```
import scipy.stats as stats

# Применение теста Шапиро-Уилка
def shapiro_wilk_test(data):
    stat, p_value = stats.shapiro(data)
    return stat, p_value

# Данные для интервалов
data_10_15 = [10, 12, 14, 10, 15, 13, 11, 12, 13, 15, 14, 11, 10, 12, 15, 11, 13, 14, 12, 15]
data_10_20 = [10, 15, 17, 12, 14, 19, 10, 16, 20, 13, 11, 18, 12, 15, 19, 14, 11, 16, 20, 10]
data_10_25 = [10, 20, 15, 12, 14, 22, 11, 16, 25, 13, 18, 21, 10, 17, 24, 19, 11, 23, 12, 15]
data_10_30 = [10, 20, 25, 15, 14, 22, 13, 18, 28, 11, 17, 21, 26, 12, 29, 24, 19, 16, 27, 23]
data_10_40 = [10, 20, 35, 15, 14, 22, 13, 18, 28, 11, 17, 21, 26, 12, 30, 24, 19, 16, 27, 23]

# Применение теста Шапиро-Уилка
shapiro_10_15 = shapiro_wilk_test(data_10_15)
shapiro_10_20 = shapiro_wilk_test(data_10_20)
shapiro_10_25 = shapiro_wilk_test(data_10_25)
shapiro_10_30 = shapiro_wilk_test(data_10_30)
shapiro_10_40 = shapiro_wilk_test(data_10_40)

(shapiro_10_15, shapiro_10_20, shapiro_10_25, shapiro_10_30, shapiro_10_40)
```

Рис. 3. Использование теста Шапиро-Уилка в среде программирования Python

На рисунке 4 показаны результаты проверки для разных интервалов отклонения.

Результаты тестов Шапиро-Уилка для всех указанных интервалов подтверждают нулевую гипотезу о том, что данные распределены нормально. Это свидетельствует о том, что модель адекватно отражает реальность.

Особенностью является то, что после моделирования конфигурационные файлы виртуального оборудования загружаются в реальное [9], в соответствии с его местом в сети. Процесс имитационного моделирования можно разделить на четыре этапа:

- 1.Создание модели сети связи.
- 2.Проверка эффективности сети связи.
- 3.Подготовка конфигурационных файлов для оборудования в виртуальной модели.
- 4.Загрузка этих файлов в реальное оборудование.

Interval	Statistic	P-value
10-15 минут	0.912	0.071
10-20 минут	0.928	0.141
10-25 минут	0.936	0.203
10-30 минут	0.960	0.551
10-40 минут	0.972	0.787

Рис. 4. Результаты применение теста Шапиро-Уилка

Такой подход даёт два важных преимущества:

Сокращение времени на подготовку телекоммуникационного оборудования к работе более чем в 20 раз. Чем больше сеть, тем заметнее этот эффект.

Снижение вероятности ошибок при настройке оборудования благодаря тестированию сети в имитационной модели.

Таким образом можно сказать, что цифровой двойник (ЦД) - это комплекс программного обеспечения, который описывает поведение реальных объектов или систем в различных условиях. Он используется для прогнозирования этого поведения и оптимизации работы соответствующих систем управления. При работе с ЦД должностные лица не разрабатывают бумажные документы, а вводят исходные данные и анализируют полученные результаты и как итог формируется конфигурационный файл.

Методика работы должностных лиц по связи с применением цифровых двойников. Методика работы должностных лиц (ДЛ) по связи с применением цифровых двойников включает следующие шаги:

Определение целей и задач связи: Должностные лица анализируют потребности в связи, устанавливают требования к качеству связи и выбирают подходящие технологии.

Разработка цифрового двойника: Создаётся виртуальный прототип системы связи, который будет использоваться для моделирования и тестирования различных сценариев. Цифровой двойник должен точно отражать реальные характеристики системы связи, включая её топологию, оборудование и протоколы.

Симуляция и тестирование: С помощью цифрового двойника проводятся симуляции различных сценариев связи, включая изменение нагрузки, отказ оборудования и воздействие внешних дестабилизирующих факторов. Это позволяет оценить эффективность системы связи и выявить потенциальные проблемы до их возникновения в реальной системе.

Анализ результатов: После проведения симуляций и тестирования результаты анализируются должностными лицами по связи. Определяются слабые места системы связи и предлагаются меры по их устранению.

Планирование и постановка задач: На основе анализа результатов симуляций и тестирования должностные лица планируют мероприятия по

обеспечению связи и ставят задачи подразделениям связи. Задачи могут включать модернизацию оборудования, изменение конфигурации системы связи.

Реализация плана: Подразделения связи выполняют поставленные задачи, используя результаты симуляций и тестирования для оптимизации своих действий.

Мониторинг и адаптация: После реализации плана должностные лица продолжают мониторинг системы связи, используя цифровой двойник для выявления возможных проблем и корректировки действий подразделений связи.

Цель исследования - обеспечить повышение оперативности планирования и постановки задач на обеспечение связи с качеством не хуже требуемого.

Чтобы определить, как лучше организовать планирование и постановку задач, нужно учесть следующее:

- какие методы работы приняты в штабе объединения и сколько работы они предполагают;
- сколько времени есть на подготовку и проведение операции;
- как начальник связи решил распределить должностных лиц по связи.

На основе предоставленных начальных данных разрабатываются сетевые модели деятельности ответственных лиц в процессе планирования и постановки задач по обеспечению связи.

Методика работы ДЛ по связи, которая учитывает создание логических структур при планировании и постановке задач, включает в себя следующие этапы (рис.5):

1.Создание структуры сети передачи данных (СПД), включая схемы и таблицы распределения IP-адресов.

2.Формулирование предложений по организации СПД, их рассмотрение и утверждение.

3.Разработка распоряжения по связи с приложениями.

4.Принятие решения о применении подчинённых подразделений связи для организации СПД и утверждение этого решения у вышестоящего руководства.

4.Подготовка распорядительных документов для использования подчинённых подразделений связи, включая схемы-приказы, данные по связи и таблицы распределения IP-адресов, а также их распространение.

6.Разработка документации для оперативно-технической службы на узлах связи.

7.Подготовка технологических карт для настройки телекоммуникационного оборудования в аппаратных связях в соответствии с их количеством.

8.Настройка телекоммуникационного оборудования (ТКО) согласно технологическим картам, учитывая количество аппаратных (N) и наличие подготовленных специалистов (M).



Рис. 5. Методика работы ДЛ при планировании и постановке задач на обеспечение связи без использования технологии цифровых двойников

Методика работы ДЛ по связи, учитывающая создание логических структур при планировании и постановке задач с использованием технологии цифровых двойников, включает следующие этапы (рис.6):

- 1.Формирование структуры сети передачи данных (СПД), включая схемы и таблицы распределения IP-адресов.
- 2.Разработка предложений по организации СПД, их рассмотрение и утверждение.
- 3.Размещение элементов СПД в виртуальной лаборатории.
- 4.Создание адресной структуры СПД с использованием встроенных программ и «библиотечных образов» телекоммуникационного оборудования.
- 5.Тестирование параметров сформированной СПД.
- 6.Подготовка конфигурационных файлов.
- 7.Передача конфигурационных файлов на телекоммуникационное оборудование.
- 8.Загрузка конфигурационных файлов в реальное телекоммуникационное оборудование.



Рис. 6. Методика работы ДЛ при планировании и постановке задач на обеспечение связи с использованием технологии цифровых двойников

Применение методики работы ДЛ при планировании и постановке задач на обеспечение связи с использованием технологии цифровых двойников существенно повышает оперативность планирования и обеспечения связи, уменьшает вероятность ошибки и сокращает время на принятие решений (рис 7.)

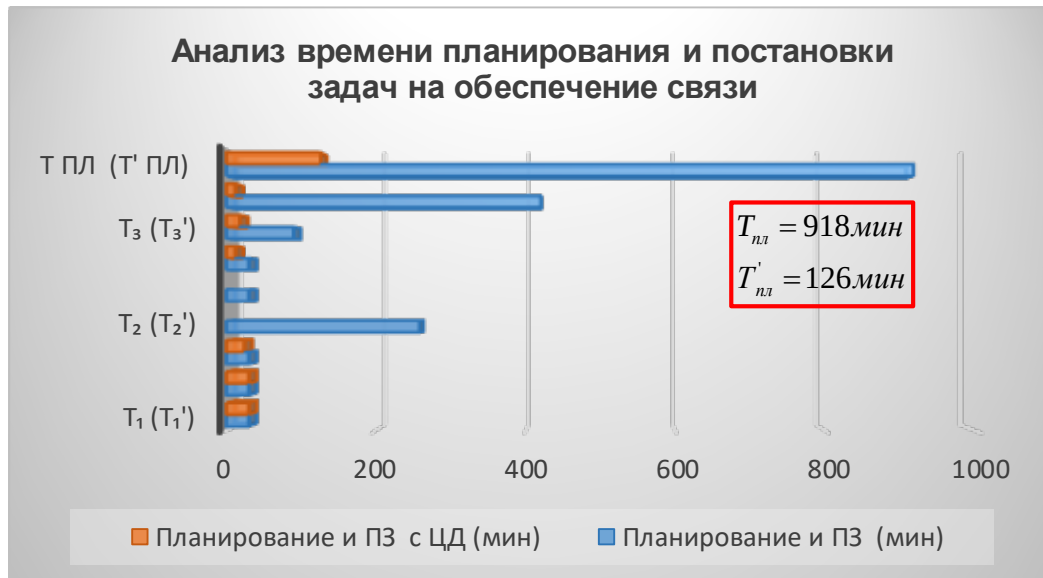


Рис. 7. Сравнение временных затрат ДЛ на планирование и постановку задач с применением технологии цифровых двойников и без неё

Изучение системы управления и методов работы должностных лиц по связи, которые включают создание логических структур, позволило определить продолжительность управленческого цикла и оценить возможность системы выполнять планирование и постановку задач на обеспечение связи в установленные сроки.

В итоге мы пришли к выводу, что текущие методы работы штабов не могут гарантировать своевременное выполнение задач на обеспечение связи с необходимым уровнем качества и детализации.

Использование метода работы должностных лиц по связи с применением цифровых двойников является эффективным решением, которое позволяет эффективно планировать и обеспечивать связь. Этот метод учитывает продолжительность управленческого цикла и способность системы выполнять задачи с нужным качеством и уровнем детализации, что особенно важно в современном мире, где скорость и точность играют решающую роль.

Заключение. В ходе исследования системы управления и методик работы должностных лиц по связи применен комплексный подход:

собран и проанализировали данные о существующих методиках работы;

создали модель системы управления для оценки её эффективности;

сравнили существующие методики работы с предложенной методикой работы с использованием технологии цифровых двойников.

Исследование показало, что существующие методы работы штабов не позволяют обеспечить своевременную постановку задач на обеспечение связи с требуемым качеством.

Методика работы должностных лиц по связи объединения с применением технологии цифровых двойников может быть эффективно использована в других регионах, применяющих цифровые средства связи. Она способствует повышению эффективности процессов планирования и постановки задач на обеспечение связи, а также улучшает качество планирования и детализации задач.

Список литературы

1. Иванов В.Г. Основы построения и оценки эффективности функционирования системы связи специального назначения в международном вооруженном конфликте на основе многосферной и конвергентной структуры ее элементов: Монография. – СПб.: ПОЛИТЕХ, 2023. – 298 с.
2. Боговик А. В., Игнатов В. В. Теория управления в системах военного назначения. – СПб. ВАС. 2008. – 468 с.
3. Падишин С.А., Сазыкин А.М., Даньшин С.С., Грищенко К.А. Имитационное планирование системы связи специального назначения на основе применения технологии цифровых двойников. Вопросы оборонной техники. – 2022. № 16. – С. 48–55.
4. Грищенко К.А. Способ построения цифрового двойника сети связи. // Вопросы радиоэлектроники. серия: техника телевидения – 2023. – № 4– С. 54–61.
5. Лукьянчик В.Н., Савицкий А.Ю., Иванов В.Г. Направления развития системы управления полевыми узлами связи объединения. Научно-технический сборник. Труды академии. – 2020. № 108, С 243-249.
6. Иванов В. Г., Астахов А. И., Кривцов С. П. [и др.] Тенденции технического развития системы связи группировки войск (сил) // Стратегическая стабильность. – 2020. – № 3/92. – С. 39–43.
7. Копичев О. А., Николаев А. Е. Современные войны: анализ тенденций развития межгосударственного противоборства, классификация форм и способов борьбы, формирование признаков и критериев военного конфликта // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 1. – С. 1–32.
8. Ермишян А. Г. Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях: учебник: в 3 ч. ВАС; А. Г. Ермишян. – СПб., 2005. – Ч. 1: Методологические основы построения организационно-технических систем военной связи. – 740 с.
9. Падишин С.А., Литвинов А.И., Манаков К.О., Шешуков А.С., Курочка В.А. Имитационное планирование системы связи объединения на основе применения виртуальной сетевой лаборатории EVE-NG. Известия РАРАН. Выпуск 5 (115), СПб.: РАРАН, 2020 г., 148-157 стр.

10. Падишин С.А., Сазыкин А.М., Даньшин С.С., Курочка В.С., Грищенко К.А. Имитационное планирование системы связи специального назначения на основе применения технологии цифровых двойников. // Вопросы оборонной техники. Серия 16: технические средства противодействия терроризму – 2021. – № 7-8 (157-158). – С. 48–55.

11. Бегаев А.Н., Стародубцев Ю.И., Фёдоров В.Г. Методика оценки управляемости фрагмента сети связи общего пользования с учетом влияния множественности центров управления и деструктивных программных воздействий // Вопросы кибербезопасности. – 2017. – № 4 (22). – С. 32–39.

Савицкий Алексей Юрьевич, адъюнкт, savialexy7@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

WORK METHODOLOGY OF OFFICIALS IN CONNECTION
WITH THE USE OF DIGITAL TWINS

A.Yu. Savitsky

The study is devoted to the application of digital twin technology. And traditional planning methods based on the logical structures of data transmission networks. The introduction of digital twins in the process of planning and setting tasks for ensuring communication significantly increases the efficiency of these processes, reducing the time for preparing telecommunications equipment by more than 20 times and reducing the likelihood of errors during configuration due to testing in a simulation model. The scientific novelty of the study lies in the development of an innovative methodology for the work of communication officials based on the use of digital twin technology. This approach is a new way to optimize management and significantly improves planning and setting tasks for ensuring communication.

Keywords: communication management system, organizational management, operational and technical management, technological management, planning.

Savitsky Alexey Savitsky, adjunct, savialexy7@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ И ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ УЧИТЫВАЮЩАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

А.Ю. Савицкий

Статья посвящена вопросам повышения оперативности в планировании и постановке задач для должностных лиц, отвечающих за связь в современных сетях передачи данных. В работе проведен анализ процессов планирования и постановки задач на трех уровнях управления: организационном, оперативно-техническом и технологическом, что влияет на продолжительность цикла управления и качество планирования. Рассматривается авторский подход к процессу планирования с применением технологии цифровых двойников. Также выполнено моделирование с использованием геометрического распределения для оценки качества планирования.

Ключевые слова: система управления, планирование и постановка задач, цифровые двойники, качество планирования, геометрическое распределение.

В контексте современного динамичного развития военно-политической обстановки системы управления связью должны обладать способностью к быстрой адаптации к изменениям, оперативному реагированию на новые вызовы и обеспечению высокого уровня надёжности функционирования. С увеличением объёмов передаваемой информации и усложнением структуры сетей передачи данных вопросы эффективного управления этими процессами приобретают особую актуальность. В данной работе предлагается модель планирования и постановки задач на обеспечение связи в рамках объединения, основанная на трёхуровневой структуре. Модель включает подробное описание процессов и применение передовых технологий цифровых двойников для оптимизации планирования и постановки задач на обеспечение связи.

Планирование и постановка задач в системе управления связью объединения. Система управления связью представляет собой интеграцию функционально связанных органов и средств управления, функционирующих на организационном, оперативно-техническом и технологическом уровнях [1]. Планирование и постановка задач (П и ПЗ) может быть структурирована на три уровня: организационный, организационно-технический и технологический (рис.1). Каждый из этих уровней выполняет специфические функции и отвечает за определенный диапазон задач, что способствует эффективному управлению процессами обеспечения связи.

1. Организационный уровень. На организационном уровне начальник связи определяет общую структуру сетей передачи данных и формулирует задачи для подчинённых. Эти задачи представляются в виде боевых распоряжений, которые сопровождаются приложениями с данными по

связи, включая типы используемого оборудования, основные технические параметры и требования к организации связи. Данный уровень обеспечивает стратегическое управление и формирует общее направление работы, устанавливая структуру взаимодействия между подразделениями и уровнями командования.

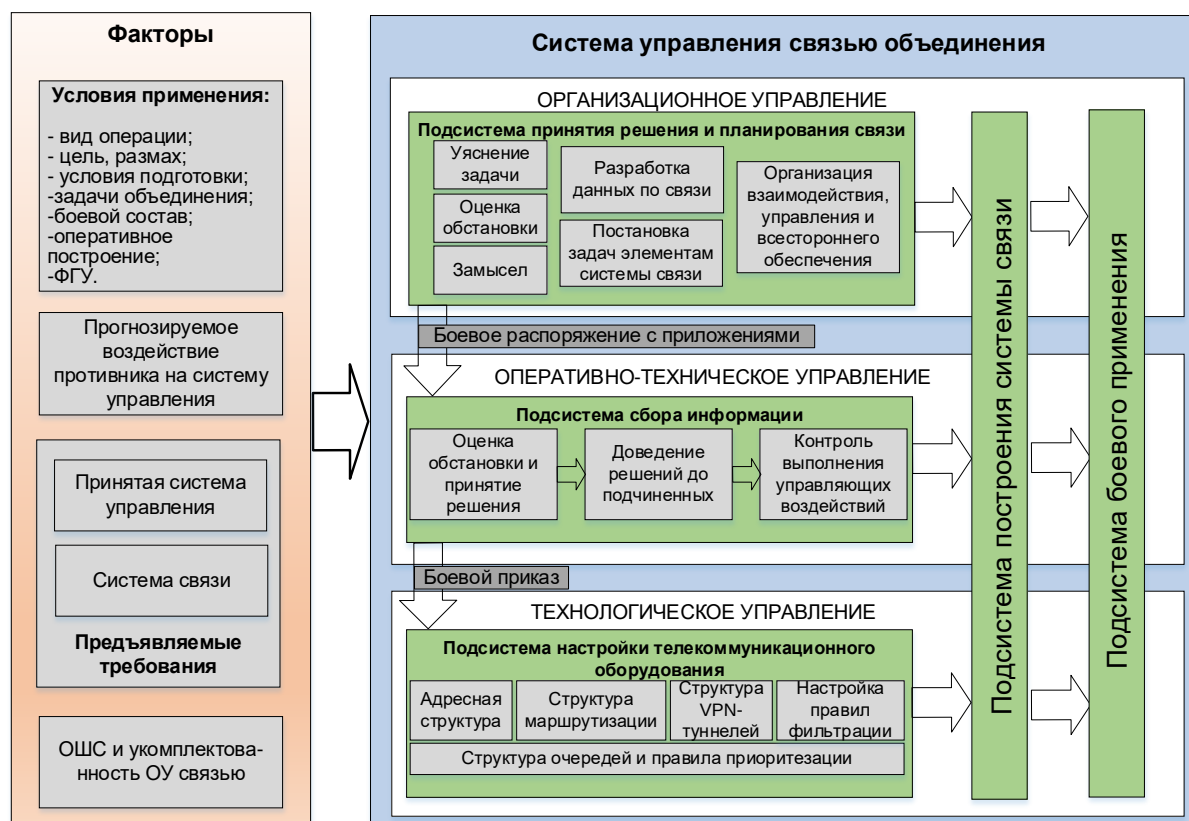


Рис.1. Система управления связью объединения

2. Организационно-технический уровень. На этом уровне командир воинской части и штаб, получив боевое распоряжение, детализируют общую задачу через разработку схем-приказ. Командир подразделения готовит схемы-приказы для боевых постов, что обеспечивает соответствие задач на более низких уровнях. Этот уровень требует участия квалифицированных специалистов, способных учитывать специфику каждого узла связи.

3. Технологический уровень. На технологическом уровне механики аппаратной связи используют схемы-приказы и технологические карты для настройки телекоммуникационного оборудования. Этот этап критически важен для эффективности работы системы связи, поскольку требует высокой квалификации и точности. Технологический уровень также связан с необходимостью регулярного обслуживания и модернизации используемого оборудования.

Ключевыми процессами управления связью на трех уровнях - организационном, оперативно-техническом и технологическом - являются планирование и постановка задач, требующие разработки логических структур

для каждого типа оборудования. Эти структуры играют важную роль в оптимизации процессов управления, что, в свою очередь, способствует повышению качества связи в системе управления.

Сложность планирования логических структур в системе связи. Применение логических структур в сети передачи данных, особенно в контексте системы связи и управления, представляет собой сложную задачу (рис.2), связанную с несколькими ключевыми аспектами: адресной структурой, маршрутизацией, организацией VPN, а также структурой услуг, очередей и правилами приоритезации трафика[3].



Рис. 2. Перечень основных настроек логических структур

Рассмотрим основные из этих составляющих более подробно.

1. Адресная структура. Адресная структура является основой для идентификации устройств в сети. В современных сетях используется иерархическая система адресации, такая как IP-адресация, которая позволяет уникально идентифицировать каждое устройство. Однако создание и поддержание такой структуры может быть сложным из-за необходимости обеспечения уникальности адресов в больших масштабах. Например, в IPv4 адреса имеют ограниченное количество комбинаций, что приводит к необходимости использования NAT (Network Address Translation) для управления адресами и предотвращения конфликтов.

Кроме того, адресация должна быть удобной для пользователей и соответствовать требованиям сетевой инфраструктуры. Это создает противоречия между необходимостью компактности адресов и их иерархической структурой.

2. Структура маршрутизации. Маршрутизация - это процесс определения оптимального пути для передачи данных от источника к получателю через сеть. Она требует наличия сложных алгоритмов и протоколов, таких как OSPF (Open Shortest Path First) или BGP (Border Gateway Protocol), которые обеспечивают эффективное распределение трафика и минимизацию задержек. Однако маршрутизация может столкнуться с проблемами, связанными с изменениями в топологии сети или перегрузкой маршрутизаторов.

Необходимо учитывать различные уровни маршрутизации: локальную (в пределах одной сети) и глобальную (между различными сетями). Каждая из этих уровней требует различных подходов к управлению маршрутами, что усложняет общую структуру управления сетью.

3. Структура VPN. Создание виртуальных частных сетей (VPN) добавляет еще один уровень сложности к управлению сетями. VPN обеспечивает безопасное соединение между удаленными устройствами через общедоступные сети, но требует тщательной настройки для обеспечения безопасности и производительности. Это включает выбор протоколов шифрования, настройку туннелей и управление доступом пользователей.

Использование VPN может привести к увеличению задержек из-за дополнительной обработки данных и шифрования. Это требует от администраторов сети постоянного мониторинга производительности и безопасности соединений.

4. Логические структуры по видам услуг. Логические структуры должны учитывать различные виды услуг, предоставляемых в сети передачи данных. Каждая услуга может иметь свои требования к качеству обслуживания (QoS), что требует разработки специализированных логических структур для их поддержки. Это включает определение приоритетов для различных типов трафика (например, голосовые вызовы могут иметь более высокий приоритет по сравнению с обычным интернет-трафиком).

5. Структура очередей и правила приоритезации. Структура очередей и правила приоритезации трафика являются важными аспектами управления сетью. Необходимость организации очередей для обработки трафика с учетом его важности создает дополнительные сложности в проектировании логических структур. Администраторы должны разрабатывать правила приоритезации, чтобы обеспечить надлежащее качество обслуживания для критически важных приложений и минимизировать задержки для менее важных данных.

6. Настройка правил фильтрации. Настройка правил фильтрации согласно структуре информационного обмена, также представляет собой сложную задачу. Фильтрация трафика должна быть адаптирована к различным типам информации, передаваемой в сети, чтобы обеспечить безопасность и соответствие нормативным требованиям. Это требует глубокого понимания структуры информационного обмена и потенциальных угроз безопасности.

Таким образом, применение и планирование логических структур в сети передачи данных представляет собой сложный процесс, требующий учета множества факторов на уровне адресации, маршрутизации, организации VPN, а также структур услуг, очередей и правил фильтрации трафика. Каждая из этих составляющих играет важную роль в обеспечении эффективного функционирования системы связи и управления в целом. Необходимость балансировки между удобством использования, оперативностью управления и безопасностью создает дополнительные сложности для специалистов связи в области сетевых технологий.

Модель планирования и постановки задач на обеспечение связи объединения, учитывающая возможность использования технологии цифровых двойников. Планирование и настройка систем связи - это сложные задачи, требующие высокой степени точности и внимательности. Одно дело - спланировать структуру сети передачи данных, и совершенно другое - реализовать эту структуру на реальном оборудовании. Здесь на помощь приходят цифровые двойники, которые значительно упрощают процесс настройки и повышают качество выполнения задач.

Преимущества использования цифровых двойников

1. Цифровые двойники представляют собой виртуальные модели, которые позволяют имитировать работу реальных систем [4]. Это дает возможность заранее протестировать различные сценарии и конфигурации, прежде чем применять их в реальной среде. В результате, вероятность ошибок при настройке оборудования снижается, поскольку все возможные варианты могут быть проверены в безопасной и контролируемой виртуальной среде и обеспечить повышение оперативности П и ПЗ (1) на обеспечение связи с качеством не хуже требуемого:

$$Pr(T_{nl} \leq T_{mp}) = P_{nl}(u(t), d, T_{mp}) \rightarrow \max_{u(t) \in U_{nl}} | Q(u(t)) \in Q_{mp} \quad (1)$$

где $Pr(T_{nl} \leq T_{mp})$ - вероятность своевременного П и ПЗ на обеспечение связи (показатель оперативности); T_{nl} - общее время П и ПЗ на обеспечение связи; T_{mp} - требуемое время П и ПЗ на обеспечение связи.

$P_{nl}(u(t), d, T_{mp})$ - функциональная зависимость вероятности своевременного П и ПЗ от T_{mp} и следующих параметров:

$u(t) = \{g(t), l(t)\}$ - реализация управляющих воздействий должностных лиц (ДЛ) связи, включающих выполнение функциональных обязанностей $g(t)$ в виде соответствующих работ $l(t)$ в процессе П и ПЗ на обеспечение связи: $t \in [0, T_{nl}]$ - текущее время в П и ПЗ на обеспечение связи.

$U_{nl} \subset (U_{nl.ЦД}, U_{nl.ЦД})$ - множество возможных управляющих воздействий ДЛ связи, включающее подмножества управляющих воздействий без использования цифровых $U_{nl.ЦД}$ двойников $U_{nl.ЦД}$ и с использованием цифрового двойника; d - совокупность дестабилизирующих факторов, влияющих на состав и временные параметры выполняемых работ $l(t)$ в процессе П и ПЗ на обеспечение связи. (Под учитываемыми дестабилизирующими факторами понимаются ожидаемые условия применения и вероятное воздействие противника на систему управления в объединении) [4].

$Q(u(t))$ - качество П и ПЗ на обеспечение связи; Q_{mp} - требуемое качество П и ПЗ на обеспечение связи;

2.Снижение вероятности ошибок: Использование цифровых двойников позволяет выявить потенциальные проблемы до их возникновения в реальной системе. Например, при планировании логических структур, таких как адресация, маршрутизация и управление трафиком, цифровые двойники позволяют моделировать различные сценарии работы сети и выявлять возможные конфликты или узкие места.

3.Улучшение качества настройки: Цифровые двойники обеспечивают более высокую степень детализации и точности при настройке оборудования. Специалисты могут использовать данные из виртуальных моделей для оптимизации параметров настройки, что ведет к улучшению качества связи. Например, при настройке правил фильтрации трафика можно протестировать различные варианты конфигурации в виртуальной среде, прежде чем применять их на практике.

4.Эффективная модель планирования: Внедрение цифровых двойников в модель планирования и постановки задач позволяет более точно оценить временные затраты и ресурсы, необходимые для выполнения задач. Это также способствует более эффективному распределению ресурсов и управлению процессами.

5.Анализ и предсказание: Цифровые двойники позволяют проводить анализ данных в реальном времени и предсказывать поведение системы при различных условиях эксплуатации. Это особенно важно для систем связи, где качество передачи данных может зависеть от множества факторов.

Функция распределения вероятности времени качественного П и ПЗ на обеспечение связи (2) может быть представлена следующим образом:

$$P_{nl} = FQ(T_{nl}, p, m_0, m, \sigma_0, \sigma) = \sum_{n=1}^{\infty} fG(n, p) \bullet FN(T_{nl}, m_0 + m \cdot n, \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2 \cdot n}) \quad (2)$$

где $T_{nl} = T_0 + T_{ц.нл} \cdot n$ - общее время П и ПЗ на обеспечение связи; T_0 - время планирования, завершающееся временем окончания этапа определения замысла; $T_{ц.нл}$ - время одного цикла планирования, включающее время принятия решения и постановки задач, завершающееся временем окончания загрузки конфигурационных файлов в телекоммуникационное оборудование; $n \geq 1$ - количество циклов, необходимых для качественного планирования; p - вероятность качественного планирования за один цикл планирования; m_0 - математическое ожидание времени T_{nl} , m - математическое ожидание времени $T_{ц.нл}$; σ_0 - стандартное отклонение времени T_{nl} , σ - стандартное отклонение времени $T_{ц.нл}$; $fG(n, p)$ - функция вероятности n циклов планирования до первого качественного при вероятности p качественного планирования за один цикл; $FN(T_{nl}, m_0 + m \cdot n, \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2 \cdot n})$ - функция распределения времени T_{nl} П и ПЗ на обеспечение связи за n циклов планирования, с параметрами математического ожидания $m_0 + m \cdot n$ и стандартного отклонения $\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2 \cdot n}$;

Следует отметить, что для оценки вероятности n циклов планирования до первого качественного результата при вероятности p качественного планирования за один цикл используется геометрическое распределение $fG(n, p)$. Это распределение способствует лучшему пониманию динамики качества связи и позволяет более точно оценивать необходимое качество планирования и постановки задач в системе управления связью оперативного командования.

В качестве функции $FN(T_{nl}, m_0 + m \cdot n, \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2 \cdot n})$ распределения времени T_{nl} П и ПЗ на обеспечение связи за n циклов планирования учитывается нормальное распределение, с параметрами математического ожидания $m_0 + m \cdot n$ и стандартного отклонения $\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2 \cdot n}$.

В процессе исследования были проанализированы риски возникновения ошибок на этапах подготовки и ввода начальных данных, а также при использовании традиционного подхода к планированию для различных видов оборудования. Результаты анализа представлены в таблице.

**Вероятности ошибок при подготовке и вводе исходных данных
в применяемом в сети передачи данных оборудовании**

№ п/п	Тип оборудова- ния	Тип операции по настройке оборудо- вания	Разновидность операции	Вероятность ошибок при подго- товке и вводе исходных данных	
				в ходе повсе- дневной дея- тельности	в сложных условиях обста- новки
1.	Граничный марш- рутизатор	Адресация	Статическая	0,1	0,15
			Динамическая	0,1	0,15
		Маршрутизация	Статическая	0,1	0,2
			Динамическая	0,05	0,1
			Ограничение петель сети	0,05	0,1
		Приоритезация	Ограничение пропускной спо- собности (shaping)	0,05	0,1
			Указание квалификационных признаков	0,05	0,1
			Деление пропускной способно- сти между типом трафика	0,05	0,1
			Маркировка трафика	0,05	0,1
2.	Межсетевой экран	Фильтрация	Ввод данных (IP-адрес, тип используемого протокола, номер логического порта транспортного уровня)	0,2	0,3
3.	АТС	Способ построения сети	с использованием сервера ре- жимной телефонной связи стар- шего штаба.	0,05	0,1
			путем формирования расширен- ных конфигурационных файлов в телефонных станциях узлов связи объединения	0,15	0,25
			с использованием сервера ре- жимной телефонной связи стар- шего штаба в режиме проксиро- вания	0,1	0,2
			путем соединения телефонных станций между собой по потоку Е1.	0,1	0,2

При расширении сети и увеличении количества единиц оборудования возрастает риск возникновения ошибок на этапе подготовки и ввода исходных данных, осуществляемых вручную [5]. В то же время снижается вероятность успешного планирования за один цикл планирования.

Применение технологии цифровых двойников имеет важное преимущество: после завершения моделирования конфигурационные файлы виртуального оборудования автоматически переносятся в реальные устройства в соответствии с их расположением в сети. Это обеспечивает высокую вероятность качественного планирования, которая оценивается как 0,99. Проведён сравнительный анализ результатов планирования без использования технологии цифровых двойников и с её применением. представленный на рис.3

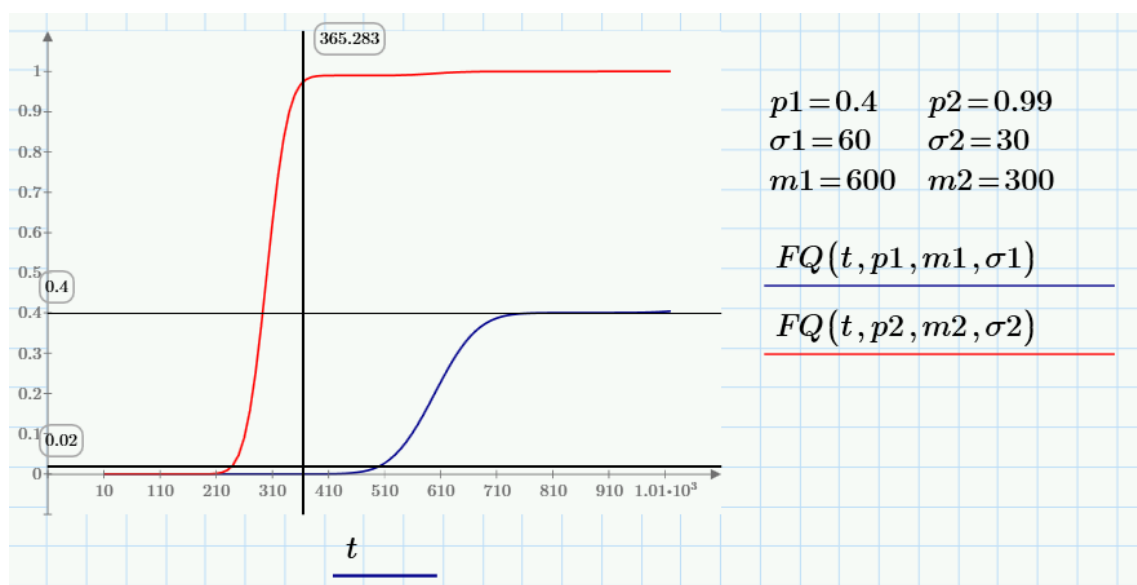


Рис.3. Сравнение функций распределения вероятности времени, необходимого для качественного планирования и постановки задач на обеспечение связи, при использовании традиционных методов планирования и при применении технологии цифровых двойников

Таким образом, использование технологии цифровых двойников в процессе планирования и настройки систем связи не только снижает вероятность ошибок, но и значительно повышает качество работы оборудования. Модель планирования и постановки задач с учетом возможностей цифровых двойников становится важным инструментом для достижения высокой эффективности управления в современных сетях связи. Применение цифровых двойников упрощает процесс настройки логических структур, что делает его более надежным и эффективным по сравнению с традиционными методами.

Заключение. Использование технологии цифровых двойников в системе управления связью объединения является актуальным подходом к оптимизации процессов планирования и обеспечения связи. Данный метод не

только повышает качество планирования, но и способствует повышению оперативности и точности работы системы управления.

Список литературы

1. Боговик А. В., Игнатов В. В. Теория управления в системах военного назначения. – СПб. ВАС. 2008. – 468 с.
2. Лукьянчик В.Н., Савицкий А.Ю., Иванов В.Г. Направления развития системы управления полевыми узлами связи объединения. Научно-технический сборник. Труды академии. – 2020. № 108, С 243-249.
3. Падишин С.А., Сазыкин А.М., Даньшин С.С., Грищенко К.А. Имитационное планирование системы связи специального назначения на основе применения технологии цифровых двойников. Вопросы оборонной техники. – 2022. № 16. – С. 48–55.
4. Падишин С.А., Литвинов А.И., Манаков К.О., Шешуков А.С., Курочка В.А. Имитационное планирование системы связи объединения на основе применения виртуальной сетевой лаборатории EVE-NG. Известия РАРАН. Выпуск 5 (115), СПб.: РАРАН, 2020 г., 148-157 стр.
5. Грищенко К.А. Способ построения цифрового двойника сети связи. // Вопросы радиоэлектроники. серия: техника телевидения – 2023. – № 4– С. 54–61.
6. Падишин С.А., Сазыкин А.М., Даньшин С.С., Курочка В.С., Грищенко К.А. Имитационное планирование системы связи специального назначения на основе применения технологии цифровых двойников. // Вопросы оборонной техники. Серия 16: технические средства противодействия терроризму– 2021. – № 7-8 (157-158). – С. 48–55.

Савицкий Алексей Юрьевич, адъюнкт, savialexey7@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

PLANNING AND TASK SETTING MODEL CONSIDERING THE POSSIBILITY OF USING DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

A.Yu. Savitsky

The article is devoted to the issues of increasing the efficiency of planning and setting tasks for officials responsible for communications in modern data transmission networks. The paper analyzes the processes of planning and setting tasks at three management levels: organizational, operational-technical and technological, which affects the duration of the management cycle and the quality of planning. The author's approach to the planning process using digital twin technology is considered. Modeling using geometric distribution to assess the quality of planning is also performed.

Key words: management system, planning and setting tasks, digital twins, planning quality, geometric distribution.

Savitsky Alexey Yuryevich, adjunc, savialexey7@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 347.771

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-34-35

ПРОВЕДЕНИЕ ПАТЕНТНОГО ПОИСКА НА ПЛАТФОРМЕ РОСПАТЕНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ТЕХНИКИ

Л.И. Алешичева, С. Ю. Борзенкова, А.Н. Троицкий

При проектировании технических объектов необходимым этапом является проведение патентного поиска для определения уровня техники. В качестве источников патентной информации используются электронные базы данных российского патентного ведомства и патентного ведомства Всемирной организации интеллектуальной собственности (ВОИС). В статье рассмотрен алгоритм и особенности поиска патентной информации по заданной тематике на современной поисковой платформе Роспатента.

Ключевые слова: патентный поиск, патентная информация, база данных патентов.

Один из необходимых проектирования является проведение поиска информации и на его основе проведение анализа существующего уровня развития техники. В настоящее время техника и технологии развиваются стремительными темпами. Важным источником, на основе которого можно оценить тенденции развития объектов техники является патентная информация, имеющая ряд особенностей, таких как полнота, достоверность, структурированность, наличие технической и юридической составляющей. Накоплен огромный массив патентных документов, содержащий более 150 млн патентных документов, который каждый год увеличивается более чем на 3 млн. патентов. В качестве источников патентной информации широко используются электронные БД патентных ведомств отдельных государств, предоставляющих информацию в электронном виде в режиме online. Однако такие базы позволяют производить поиск патентов конкретной страны. Наиболее продуктивно проводить поиск в международных поисковых системах, а именно Всемирной организации интеллектуальной собственности (ВОИС) PATENTSCOPE (<https://patentscope.wipo.int>), европейского патентного ведомства ESPACE.NET (ЕПВ) (<http://ep.espacenet.com>), GooglePatent (<https://patents.google.com>).

В связи со сложившимися в наше время обстоятельствами Россия активно занимается импортозамещением во многих сферах, в том числе и в сфере компьютерных технологий (ИТ). Для этого была принята национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» и в рамках данной программы 29 марта 2022 года Роспатент запустил цифровую платформу для проведения патентного поиска по мировому фонду изобретений и полезных моделей. На разработанной поисковой платформе (ИС «Поисковая платформа») реализован поиск сведений по патентам,

включая российские патенты и патенты стран СНГ. В базе поисковика содержится более 135 млн. документов из 52 государств и патентных ведомств.

Особенностями поисковой платформы являются многоязычный полнотекстовый и атрибутивный поиск на основных европейских языках, поиск на основе патентных классификаторов, поиск с использованием искусственного интеллекта, поиск по химическим формулам, генетическим последовательностям, поиск по непатентным источникам информации. Впервые реализован программный интерфейс, который позволяет разработчикам программных продуктов обращаться к поисковой системе при помощи встроенного программного интерфейса (API), который описывает механизмы взаимодействия одного программного продукта с другим программным продуктом.

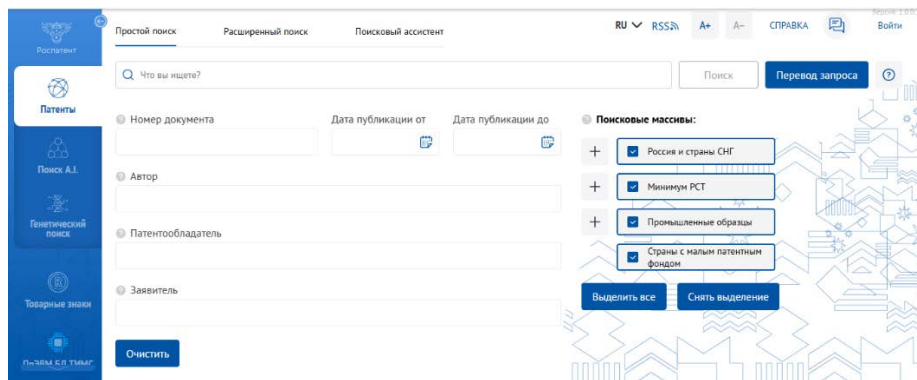


Рис. 1. Страница интерфейса «Простой поиск»

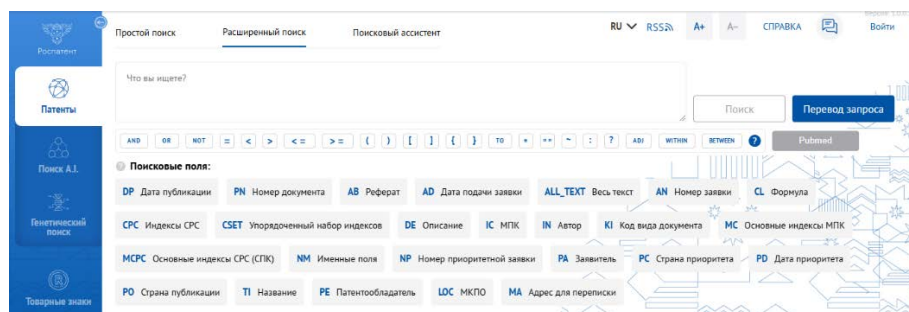


Рис. 2. Страница интерфейса «Расширенный поиск»

На платформе также размещены аналитические сервисы, которые позволят проводить мониторинг показателей сферы интеллектуальной собственности. В настоящее время завершаются работы для обеспечения поиска на цифровой платформе сведений по товарным знакам и промышленным образцам. Для получения доступа к цифровой платформе необходимо перейти по ссылке: <https://searchplatform.rospatent.gov.ru>. Также доступ может быть осуществлен с главной страницы сайта Роспатента.

На рисунках 1 и 2 представлены интерфейс системы поиска патентной платформы.

Алгоритм поиска заявок и патентов на изобретения на патентной платформе Роспатента следующий:

1. По адресу <https://searchplatform.rospatent.gov.ru/> войти на главную страницу в поисковую базу данных Патентной платформы. Поиск проводится в поисковых массивах России, стран СНГ, Минимума РСТ и стран с малым патентным фондом.

2. Выбрать вид поиска в заголовке Главной страницы:

- "Простой поиск" используется для проведения экспресс-поиска по ключевым словам, по номеру документа, по автору, по заявителю и патенто-обладателю, дате публикации;

- "Расширенный поиск" позволяет проводить поиск по поисковым полям, таким как дата публикации, дата приоритет, реферат, название, описание, формула, автор, индексы МПК и СРС, адрес для переписки, а также осуществлять полнотекстовый поиск по всему тексту патента.

Функционал расширенного поиска позволяет составлять сложные поисковые запросы, используя различные операторы, такие как AND (и), OR (или), NOT (нет), BETWEEN (используется для поиска «ключевое слово» между двумя другими заданными словами), WITHIN (используется для задания степени «близости» между ключевыми словами и т.д.). На рисунке 3 представлен пример сложного запроса и результаты поиска.

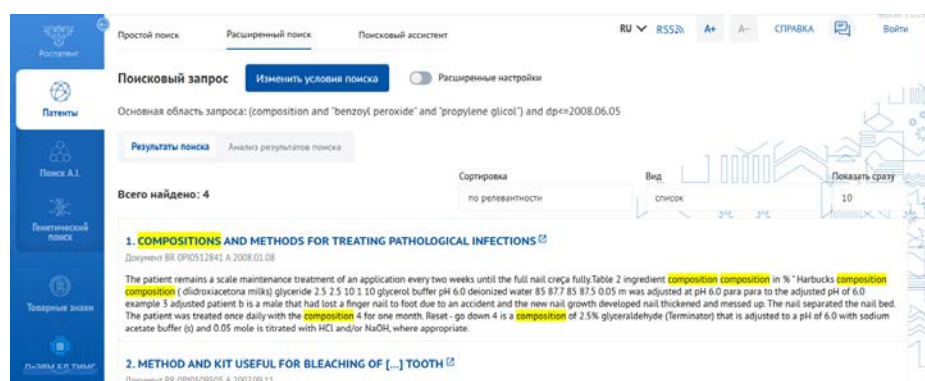


Рис. 3. Пример сложного запроса

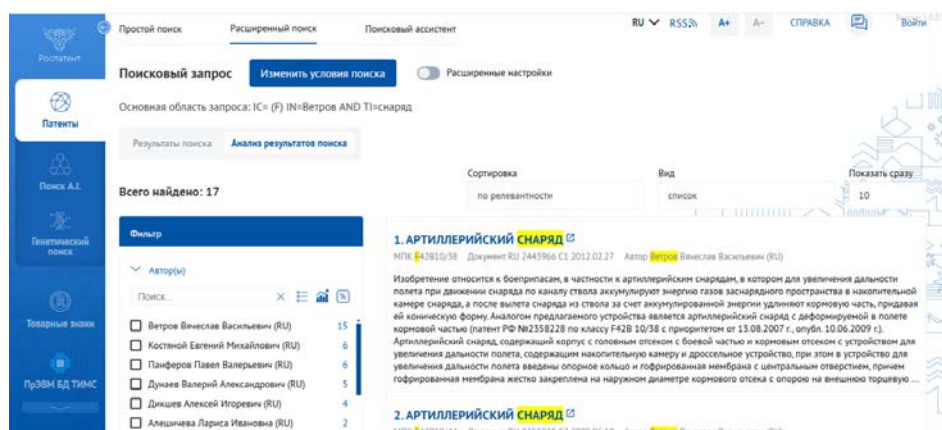


Рис. 4. Результаты поиска с помощью «Поискового ассистента»

На странице также представлена структура Классификаторов МПК и СРС. Имеется функционал для перевода ключевых слов на основные европейские языки.

Также здесь представлен «Поисковый ассистент», с помощью которого осуществляется построение сложного поискового запроса. На рисунке 4 представлен сложный запрос, сформулированный через поискового ассистента, а также результаты поиска и их анализ.

Имеется функционал поиска по непатентной литературе в медицинской и биологической БД PubMed.

На странице имеется «Поиск AI», реализующий функцию поиска патентных документов, содержащих не менее 50 слов (в том числе заявок, отчетов о поиске), используя функции поиска «По тексту документа» с помощью искусственного интеллекта.

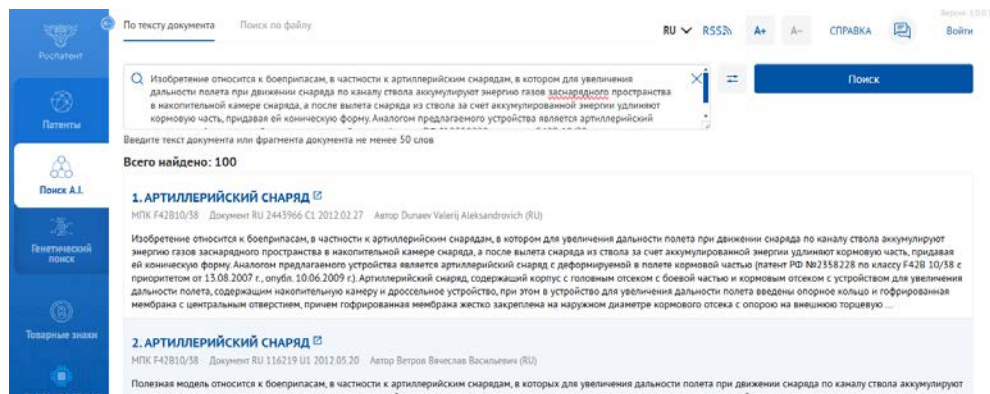


Рис. 5. Результат поиска через «Поиск AI»

Также возможен режим поиска по содержимому документа в формате PDF, TXT, RTF, DOC, DOCX. Для этого необходимо загрузить на странице «Поиск по файлу» (рисунок 6). Файл будет распознан, проанализирован, и его содержимое использоваться для расширенного поиска.

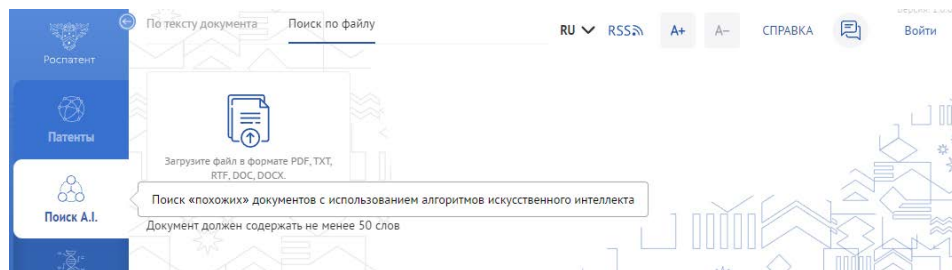


Рис. 6. Загрузка документа для поиска с помощью AI

Таким образом российская патентная платформа позволяет проводить простой и расширенный патентный поиск в ходе проектирования изделий и отличается высоким уровнем автоматизации, использованием искусственного интеллекта и обладает простым и интуитивно-понятным интерфейсом. Поиск осуществляется как в базе Роспатента, так и в международных базах.

Список литературы

1. Особенности проведения патентных исследований в отношении стран с малым патентным фондом, Издательство Санкт-Петербургского политехнического университета имени Петра Великого, 2017. С. 3–5. Алешичева Л.И., Борзенкова С.Ю., Троицкий А.Н.

2. «Роспатент» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fips.ru> (дата обращения: 13.11.2024).

3. «ВОИС - Поиск по национальным патентным фондам и фондам РСТ» [Электронный ресурс]. URL: <https://patentscope.wipo.int> (дата обращения: 13.11.2024).

Алешичева Лариса Ивановна, доцент, aleshicheva68@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Борзенкова Светлана Юрьевна, доцент, tehnol@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Троицкий Александр Николаевич, доцент, antroitsky@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CONDUCTING A PATENT SEARCH ON THE ROSPATENT PLATFORM WHEN DESIGNING TECHNICAL OBJECTS

L.I. Aleshicheva, S.Yu. Borzenkova, A.N. Troitsky

When designing technical objects, a necessary step is to conduct a patent search to determine the level of technology. Electronic databases of the Russian patent office and the patent office of the World Intellectual Property Organization (WIPO) are used as sources of patent information. The article discusses the algorithm and features of searching for patent information on a given topic on the modern search platform of Rospatent.

Key words: patent search, patent information, patent database.

Aleshicheva Larisa Ivanovna, docent, aleshicheva68@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Borzenkova Svetlana Yuryevna, docent, tehnol@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Troitsky Alexander Nikolaevich, docent, antroitsky@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

МЕТОДИКА НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ И КОРРЕКЦИИ БИНС ЛА В ПОЛЁТЕ

О.С. Балабаев, А.В. Прохорцов

В данной статье представлены методы начальной выставки и коррекции бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) для летательных аппаратов (ЛА) в условиях отсутствия сигналов спутниковых навигационных систем и ограниченного времени предстартовой подготовки. Предлагается методика, основанная на приеме сигналов от трёх радиомаяков, позволяющая осуществлять начальную выставку и коррекцию БИНС по координатам, скорости и ориентации непосредственно в полёте. Разработана математическая модель данной методики. Предложенный подход повышает точность навигации ЛА и может быть полезен при разработке навигационных систем для различных типов высокоманёвренных летательных аппаратов.

Ключевые слова: БИНС, ЛА, начальная выставка, коррекция, фазовые интерферометрические измерения, частота Доплера, коническое сканирование.

Современные ЛА часто функционируют в условиях, где сигналы спутниковых навигационных систем недоступны или нестабильны, а время на предстартовую подготовку ограничено. В таких обстоятельствах точная работа навигационных систем, в частности БИНС, становится критически важной. Данная работа посвящена разработке методики начальной выставки и коррекции БИНС, которая позволяет выставлять и корректировать БИНС непосредственно в полёте, используя сигналы наземных радиомаяков. Такой подход повышает точность и надёжность доставки ЛА к пункту назначения, снижая зависимость от внешних сигналов и обеспечивая стабильность навигации даже в сложных условиях.

Предлагаемая методика начальной выставки и коррекции БИНС, установленной на ЛА, состоит из трёх методов:

1. Метод начальной выставки БИНС и её коррекции в процессе полёта ЛА по координатам с использованием фазовых интерферометрических измерений;

2. Метод начальной выставки БИНС и её коррекции в процессе полёта ЛА по скорости при помощи информации об углах между направлением на антенну и вектор-базы пар радиомаяков и частоты принимаемого сигнала – частоты Доплера;

3. Метод начальной выставки БИНС и её коррекции в процессе полёта ЛА по параметрам ориентации при помощи антенны, установленной на ЛА и системе распределённых радиомаяков, основанный на их пеленговании при помощи метода конического сканирования.

Далее рассмотрим более подробно каждый из них.

1.1 Метод начальной выставки и коррекции БИНС ЛА по координатам. Суть предлагаемого метода заключается в измерении разности фаз несущей частоты сигналов, принимаемых от наземных разнесённых радиомаяков (точки $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$, $C(x_3, y_3, z_3)$) (рис.1) на одну антенну,

установленную на ЛА (точка $P(x_0, y_0, z_0)$). В этих разностях, обусловленных неодинаковым расстоянием до баз излучателей, содержится информация об угле между направлением на приёмную антенну и прямой, определяющей вектор-базу пар наземных радиомаяков.

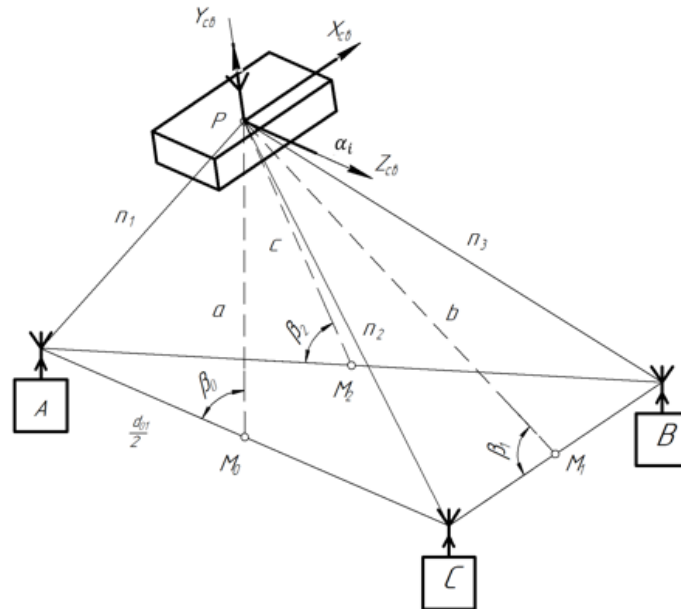


Рис. 1. К пояснению методики начальной выставки и коррекции БИНС ЛА по координатам

При исследовании работы радионавигационной и инерциальной систем будем использовать системы координат:

1. Стартовая система координат $O_c X_c Y_c Z_c$.
2. Нормальная подвижная система координат $O X_g Y_g Z_g$ (движется вместе с объектом):
 - точка O совпадает с центром масс объекта в точке старта;
 - ось $O X_g$ – направлена вверх по линии местной вертикали;
 - ось $O Y_g$ – лежит в горизонтальной плоскости по касательной к параллели на восток;
 - ось $O Z_g$ – лежит в горизонтальной плоскости по касательной к меридиану на север.
3. Связанная система координат $O X Y Z$:
 - точка O совпадает с центром масс объекта в точке старта;
 - ось $O X$ – лежит в плоскости симметрии объекта, нормально по оси $O Y$;
 - ось $O Z$ – направлена по продольной оси объекта;
 - ось $O Y$ – перпендикулярно плоскости симметрии, в сторону правого крыла.

Положение связанной системы координат по отношению к нормальной подвижной определяется углами Эйлера-Крылова (угол курса ψ , тангажа ϑ , крена γ).

Рассмотрим подробнее алгоритм предлагаемого метода:

1. Задаются входные данные в вычислитель: координаты радиомаяков и расстояние между ними, а также измеряются разности фаз приёма сигналов в точке P .

2. Вычисляются углы между векторами-базами излучателей и векторами-направлений на приёмник, которые необходимы для определения дальности до этого приёмника, представляющие собой рёбра неправильной пирамиды (рис.1).

Разность фаз сигналов, принимаемых в точке P связана с углом β_1 между вектором-базы излучателей AB и вектором-направлением на приёмник a_1 , соединяющим середину базы AB и приёмник P соотношением:

$$\cos \beta_1 = \frac{\Delta\varphi_{12} \cdot \lambda}{2\pi \cdot d_{12}} \quad (1)$$

Соответственно для всех трёх углов можно записать следующие выражения:

$$\cos \beta_1 = \frac{\Delta\varphi_{12} \cdot \lambda}{2\pi \cdot d_{12}}, \quad \cos \beta_2 = \frac{\Delta\varphi_{23} \cdot \lambda}{2\pi \cdot d_{23}}, \quad \cos \beta_3 = \frac{\Delta\varphi_{13} \cdot \lambda}{2\pi \cdot d_{13}}, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi_{12}$, $\Delta\varphi_{23}$, $\Delta\varphi_{13}$ – разности фаз, принимаемые приёмником от соответствующих пар излучателей, λ – длина волны излучаемых импульсов; d_{12} , d_{23} , d_{13} – расстояния между парами излучателей.

Расстояния между излучателями рассчитываются как расстояние между двумя точками по формуле:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}, \quad (3)$$

где x_i , y_i , z_i и x_j , y_j , z_j – координаты пар наземных излучателей.

3. Решается система нелинейных уравнений (4) относительно неизвестных координат подвижного объекта X , Y , Z .

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \sqrt{\left(\frac{x_1+x_2}{2} - X\right)^2 + \left(\frac{y_1+y_2}{2} - Y\right)^2 + \left(\frac{z_1+z_2}{2} - Z\right)^2} \\ b = \sqrt{\left(\frac{x_2+x_3}{2} - X\right)^2 + \left(\frac{y_2+y_3}{2} - Y\right)^2 + \left(\frac{z_2+z_3}{2} - Z\right)^2} \\ c = \sqrt{\left(\frac{x_1+x_3}{2} - X\right)^2 + \left(\frac{y_1+y_3}{2} - Y\right)^2 + \left(\frac{z_1+z_3}{2} - Z\right)^2} \\ n_1^2 = \left(\frac{d_{12}}{2}\right)^2 + a^2 - d_{12} \cdot a \cdot \cos\left(\beta_1 \frac{\pi}{180}\right) \\ n_2^2 = \left(\frac{d_{23}}{2}\right)^2 + b^2 - d_{23} \cdot b \cdot \cos\left(\beta_2 \frac{\pi}{180}\right) \\ n_3^2 = \left(\frac{d_{13}}{2}\right)^2 + c^2 - d_{13} \cdot c \cdot \cos\left(\beta_3 \frac{\pi}{180}\right) \\ n_1 = \sqrt{(x_1 - X)^2 + (y_1 - Y)^2 + (z_1 - Z)^2} \\ n_2 = \sqrt{(x_2 - X)^2 + (y_2 - Y)^2 + (z_2 - Z)^2} \\ n_3 = \sqrt{(x_3 - X)^2 + (y_3 - Y)^2 + (z_3 - Z)^2} \end{array} \right. , \quad (4)$$

где a , b , c – векторы-направления на соответствующие базы излучателей, n_1 , n_2 , n_3 – расстояния между приёмной антенной и соответствующим излучателем.

Первые и последние три выражения, описывающие вычисление длин отрезков пирамиды (рис.1)– векторов-направлений на базы излучателей и боковых рёбер, соответственно, получены по формуле, аналогичной(3). Выражения для n_1^2 , n_2^2 , n_3^2 записаны на основании теоремы косинусов для соответствующих треугольников пирамиды.

Стоит отметить, что аналитически данная система не решается, это связано с большой нелинейностью системы и с наличием одновременно степеней нескольких порядков и наличием корней. Более того, другие комбинации уравнений, выходящих из определения свойств пирамиды и включающих в свой состав другие неизвестные, не даёт возможности их аналитического вывода. Поэтому, в данной работе принято решение решать численно эти уравнения. Дальнейшее моделирование покажет, что точность такого решения будет достаточной, а кол-во итераций не будет проблемой в плане затраты вычислительных ресурсов.

Полученная система нелинейных уравнений (4) относительно неизвестных координат X, Y, Z ЛА имеет 9 неизвестных: $X, Y, Z, a, b, c, n_1, n_2, n_3$. Для того чтобы решить полученную систему уравнений численно, например методом Ньютона, нужно привести исходную систему к более удобному виду.

В системе (4) основными уравнениями являются уравнения для n_1^2 , n_2^2 , n_3^2 , так как они выражаются через остальные переменные. Соответственно в эти уравнения были подставлены уравнения для переменных a, b, c, n_1, n_2, n_3 . Для упрощения исходной системы путём стандартных преобразований и многочисленных подстановок переменных была получена следующая система уравнений в общем виде относительно неизвестных X, Y, Z :

$$\begin{cases} f_1 X^2 + f_2 Y^2 + f_3 Z^2 + c_1 - Xb_1 - Yb_2 - Zb_3 - 2a_1 Xp_1 - \\ - 2a_1 Yp_2 - 2a_1 Zp_3 - 2XYp_1p_2 - 2XZp_1p_3 - 2YZp_2p_3 = 0 \\ f_4 X^2 + f_5 Y^2 + f_6 Z^2 + c_2 - Xb_4 - Yb_5 - Zb_6 - 2a_2 Xp_4 - \\ - 2a_2 Yp_5 - 2a_2 Zp_6 - 2XYp_4p_5 - 2XZp_6p_4 - 2YZp_6p_5 = 0 \\ f_7 X^2 + f_8 Y^2 + f_9 Z^2 + c_3 - Xb_7 - Yb_8 - Zb_9 - 2a_3 Xp_7 - \\ - 2a_3 Yp_8 - 2a_3 Zp_9 - 2XYp_7p_8 - 2XZp_9p_7 - 2YZp_9p_8 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Выражения для расчёта всех коэффициентов при неизвестных и других слагаемых запишем отдельно в таблицу:

Таблица 1

Коэффициенты при неизвестных в системе нелинейных уравнений

Наименование коэффициента	Значение коэффициента	Наименование коэффициента	Значение коэффициента
p_1	$x_1 - x_2$	$m_1(t)$	$\cos\left(\frac{\pi\beta_1(t)}{180^\circ}\right) d_{12}$
p_2	$y_1 - y_2$	$m_2(t)$	$\cos\left(\frac{\pi\beta_2(t)}{180^\circ}\right) d_{23}$
p_3	$z_1 - z_2$	$m_3(t)$	$\cos\left(\frac{\pi\beta_3(t)}{180^\circ}\right) d_{13}$

Наименование коэффициента	Значение коэф- фициента	Наименование коэффициента	Значение коэффициента
p_4	$x_2 - x_3$	s_1	$x_1^2 + 2x_1x_2 + x_2^2 + y_1^2 + 2y_1y_2 + y_2^2 + z_1^2 + 2z_1z_2 + z_2^2$
p_5	$y_2 - y_3$	s_2	$2x_2x_3 + x_3^2 + y_2^2 + 2y_2y_3 + y_3^2 + z_2^2 + 2z_2z_3 + z_3^2 + x_2^2$
p_6	$z_2 - z_3$	s_3	$x_1^2 + 2x_1x_3 + x_3^2 + y_1^2 + 2y_1y_3 + y_3^2 + z_1^2 + 2z_1z_3 + z_3^2$
p_7	$x_3 - x_1$	s_4	$x_1^2 + y_1^2 + z_1^2$
p_8	$y_3 - y_1$	s_5	$x_2^2 + y_2^2 + z_2^2$
p_9	$z_3 - z_1$	s_6	$x_3^2 + y_3^2 + z_3^2$
h_1	$s_1/4$	a_1	$\frac{d_{12}^2}{4} + h_1 - s_4$
h_2	$s_2/4$	a_2	$\frac{d_{23}^2}{4} + h_2 - s_5$
h_3	$s_3/4$	a_3	$\frac{d_{13}^2}{4} + h_3 - s_6$
v_1	$x_1 + x_2$	$f_1(t)$	$m_1^2(t) - p_1^2$
v_2	$y_1 + y_2$	$f_2(t)$	$m_1^2(t) - p_2^2$
v_3	$z_1 + z_2$	$f_3(t)$	$m_1^2(t) - p_3^2$
v_4	$x_2 + x_3$	$f_4(t)$	$m_2^2(t) - p_4^2$
v_5	$y_2 + y_3$	$f_5(t)$	$m_2^2(t) - p_5^2$
v_6	$z_2 + z_3$	$f_6(t)$	$m_2^2(t) - p_6^2$
v_7	$x_1 + x_3$	$f_7(t)$	$m_3^2(t) - p_7^2$
v_8	$y_1 + y_3$	$f_8(t)$	$m_3^2(t) - p_8^2$
v_9	$z_1 + z_3$	$f_9(t)$	$m_3^2(t) - p_9^2$
$b_1(t)$	$m_1^2(t)v_1$	$c_1(t)$	$h_1m_1^2(t) - a_1^2$
$b_2(t)$	$m_1^2(t)v_2$	$c_2(t)$	$h_2m_1^2(t) - a_2^2$
$b_3(t)$	$m_1^2(t)v_3$	$c_3(t)$	$h_3m_1^2(t) - a_3^2$
$b_4(t)$	$m_2^2(t)v_4$	$b_7(t)$	$m_3^2(t)v_7$
$b_5(t)$	$m_2^2(t)v_5$	$b_8(t)$	$m_3^2(t)v_8$
$b_6(t)$	$m_2^2(t)v_6$	$b_9(t)$	$m_3^2(t)v_9$

Аналитическое решение (5) системы нелинейных уравнений (4), при соответствующей подстановке рассчитанных коэффициентов, позволяет привести систему к такому виду, при котором возможно её численное решение любым из соответствующих методов с заданной точностью ε .

В данной работе предлагается использовать метод Ньютона. Вычислим Якобиан системы уравнений (5) (пусть функция $F(X, Y, Z)$ описывает всю систему уравнений сразу) по формуле:

$$W(X, Y, Z) = \begin{pmatrix} \frac{d}{dX}(F(X, Y, Z)_0) & \frac{d}{dY}(F(X, Y, Z)_0) & \frac{d}{dZ}(F(X, Y, Z)_0) \\ \frac{d}{dX}(F(X, Y, Z)_1) & \frac{d}{dY}(F(X, Y, Z)_1) & \frac{d}{dZ}(F(X, Y, Z)_1) \\ \frac{d}{dX}(F(X, Y, Z)_2) & \frac{d}{dY}(F(X, Y, Z)_2) & \frac{d}{dZ}(F(X, Y, Z)_2) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Подставляем выражения (5) как матрицу в (6) и получаем частные производные системы уравнений:

$$\begin{cases}
 \frac{d}{dX}(F(X, Y, Z)_0) = 2Xf_1 - 2a_1p_1 - b_1 - 2Yp_1p_2 - 2Zp_1p_3 \\
 \frac{d}{dX}(F(X, Y, Z)_1) = 2Xf_4 - 2a_2p_4 - b_4 - 2Yp_4p_5 - 2Zp_4p_6 \\
 \frac{d}{dX}(F(X, Y, Z)_2) = 2Xf_7 - 2a_3p_7 - b_7 - 2Yp_7p_8 - 2Zp_7p_9 \\
 \frac{d}{dY}(F(X, Y, Z)_0) = 2Yf_2 - 2a_1p_2 - b_2 - 2Xp_1p_2 - 2Zp_2p_3 \\
 \frac{d}{dY}(F(X, Y, Z)_1) = 2Yf_5 - 2a_2p_5 - b_5 - 2Xp_4p_5 - 2Zp_5p_6 \\
 \frac{d}{dY}(F(X, Y, Z)_2) = 2Yf_8 - 2a_3p_8 - b_8 - 2Xp_7p_8 - 2Zp_8p_9 \\
 \frac{d}{dZ}(F(X, Y, Z)_0) = 2Zf_3 - 2a_1p_3 - b_3 - 2Xp_1p_3 - 2Yp_2p_3 \\
 \frac{d}{dZ}(F(X, Y, Z)_1) = 2Zf_6 - 2a_2p_6 - b_6 - 2Xp_4p_6 - 2Yp_5p_6 \\
 \frac{d}{dZ}(F(X, Y, Z)_2) = 2Zf_9 - 2a_3p_9 - b_9 - 2Xp_7p_9 - 2Yp_8p_9
 \end{cases} \quad (7)$$

Далее, рассчитав необходимые коэффициенты и задавшись начальным приближением $x_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$ и точностью вычислений ε , в вычислителе ЛА, начинается рекурсивный итерационный алгоритм:

$$\begin{aligned}
 x_0 &= x_0 - W(x_{00}, x_{01}, x_{02})^{-1} F(x_{00}, x_{01}, x_{02}) \\
 x_i &= x_{i-1} - W((x_{i-1})_0, (x_{i-1})_1, (x_{i-1})_2)^{-1} F((x_{i-1})_0, (x_{i-1})_1, (x_{i-1})_2), \quad (8)
 \end{aligned}$$

где x_0 – это точка начального приближения численного решения уравнения, x_i – следующая итерация численного решения.

Таким образом, вычисления, производимые в (8) осуществляются для каждой позиции ЛА в пространстве, при этом в качестве начального приближения для каждой следующей позиции может выступать решение системы для предыдущей позиции. Стоит отметить, что для вычисления первой позиции начальное приближение может быть задано с эталонной БИНС или при помощи других средств обеспечения навигационной информации.

1.2 Метод начальной выставки и коррекции БИНС ЛА по линейной скорости. Определение проекций линейной скорости осуществляется за счёт использования информации об углах между направлением на антенну и вектор-базы пар радиомаяков и частоте f_{di} принимаемого сигнала, которая измеряется на антенне ЛА за счёт эффекта Доплера (в описываемом случае данный эффект связывает изменение регистрируемой частоты на антенне ЛА с относительной скоростью v_{di} движения самого ЛА по отношению к каждому радиомаяку):

$$f_{di} = \frac{2v_{di}}{\lambda}, \quad (9)$$

Проекции абсолютной линейной скорости v_x , v_y , v_z – определяются при помощи радиально-скоростного (доплеровского) метода при помощи следующего выражения, записанного для момента времени t :

$$v_{di} = \frac{(x-x_i)v_x + (y-y_i)v_y + (z-z_i)v_z}{r_{di}}, \quad (10)$$

Для описываемого случая, когда система состоит из 3 радиомаяков (рис. 1), запишем систему уравнений относительно неизвестных проекций линейной абсолютной скорости объекта на оси координат:

$$\begin{cases} v_{d1} = \frac{(x-x_1)v_x + (y-y_1)v_y + (z-z_1)v_z}{r_{d1}} \\ v_{d2} = \frac{(x-x_2)v_x + (y-y_2)v_y + (z-z_2)v_z}{r_{d2}} \\ v_{d3} = \frac{(x-x_3)v_x + (y-y_3)v_y + (z-z_3)v_z}{r_{d3}} \end{cases}, \quad (11)$$

После аналитического решения системы уравнений (11) относительно неизвестных проекций линейной абсолютной скорости на оси XYZ v_x , v_y , v_z получим:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{y(k_4r_1v_{d1} - k_6r_2v_{d2} + k_7r_3v_{d3}) - z(k_8r_1v_{d1} - k_9r_2v_{d2} + k_{10}r_3v_{d3}) + k_{11}r_1v_{d1} - k_{12}r_2v_{d2} + k_{13}r_3v_{d3}}{k_5 + xk_2 - yk_3 + zk_1} \\ v_y &= -\frac{x(k_4r_1v_{d1} - k_6r_2v_{d2} + k_7r_3v_{d3}) - z(k_{14}r_1v_{d1} - k_{15}r_2v_{d2} + k_{16}r_3v_{d3}) + k_{17}r_1v_{d1} - k_{18}r_2v_{d2} + k_{19}r_3v_{d3}}{k_5 + xk_2 - yk_3 + zk_1} \\ v_z &= \frac{x(k_8r_1v_{d1} - k_9r_2v_{d2} + k_{10}r_3v_{d3}) - y(k_{14}r_1v_{d1} - k_{15}r_2v_{d2} + k_{16}r_3v_{d3}) + k_{20}r_1v_{d1} - k_{21}r_2v_{d2} + k_{22}r_3v_{d3}}{k_5 + xk_2 - yk_3 + zk_1} \end{aligned} \quad (12)$$

где $k_1 \dots k_{22}$ – коэффициенты, определяющие геометрию системы (положение радиомаяков на местности) и вычисляемые заранее, $r_1 \dots r_3$ – расстояния от радиомаяка до антенны ЛА.

Коэффициенты $k_1 \dots k_{22}$ и их значения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты при неизвестных в системе нелинейных уравнений относительно неизвестных проекций линейной абсолютной скорости

Наименование коэффициента	Значение коэффициента	Наименование коэффициента	Значение коэффициента
k_1	$x_1y_2 - x_2y_1 - x_1y_3 + x_3y_1 + x_2y_3 - x_3y_2$	k_{12}	$y_1z_3 - y_3z_1$
k_2	$y_1z_2 - y_2z_1 - y_1z_3 + y_3z_1 + y_2z_3 - y_3z_2$	k_{13}	$y_1z_2 - y_2z_1$
k_3	$x_1z_2 - x_2z_1 - x_1z_3 + x_3z_1 + x_2z_3 - x_3z_2$	k_{14}	$x_2 - x_3$
k_4	$z_2 - z_3$	k_{15}	$x_1 - x_3$
k_5	$-x_1y_2z_3 + x_1y_3z_2 +$	k_{16}	$x_1 - x_2$

Наименование коэффициента	Значение коэффициента	Наименование коэффициента	Значение коэффициента
	$+x_2y_1z_3 - x_2y_3z_1 - x_3y_1z_2 + x_3y_2z_1$		
k_6	$z_1 - z_3$	k_{17}	$x_2z_3 - x_3z_2$
k_7	$z_1 - z_2$	k_{18}	$x_1z_3 - x_3z_1$
k_8	$y_2 - y_3$	k_{19}	$x_1z_2 - x_2z_1$
k_9	$y_1 - y_3$	k_{20}	$x_2y_3 - x_3y_2$
k_{10}	$y_1 - y_2$	k_{21}	$x_1y_3 - x_3y_1$
k_{11}	$y_2z_3 - y_3z_2$	k_{22}	$x_1y_2 - x_2y_1$

Таким образом, вычисления производимые в (12) осуществляются для каждой позиции ЛА в пространстве, при этом данные выражения являются конечными для определения проекций линейной скорости в абсолютной системе координат.

1.3 Метод начальной выставки и коррекции БИНС ЛА по ориентации. В рамках описанной системы (рис.1) выше разработан метод начальной выставки и коррекции БИНС по параметрам ориентации, основная сущность которого заключается в следующем.

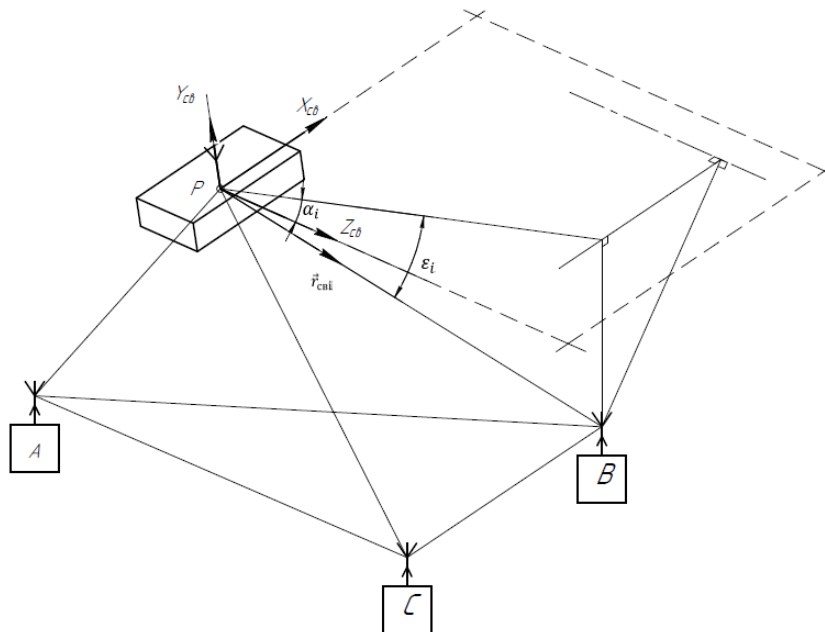


Рис.2. К пояснению методики начальной выставки и коррекции БИНС ЛА по ориентации

В основе предлагаемого способа определения ориентации ЛА лежит измерение углов отклонения источника излучения от равносигнального направления и углов между опорным направлением и направлением на проекции источника излучения (радиомаяка) по сигналам, принимаемым от наземных разнесённых радиомаяков на одну антенну, установленную на ЛА. При помощи этих углов, обусловленных неодинаковой ориентацией антенны в пространстве относительно каждого радиомаяка, извлекается

информация об углах пеленга (3 пары углов азимута и места) – рис. 2 (на рис. 2 отмечены углы пеленга только на 1 маяк, остальные отмечаются аналогично).

1. Заблаговременно расставляются на местности три наземных радиомаяка с известными координатами в точках: $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$, $C(x_3, y_3, z_3)$, расстояние между которыми рассчитывается по известной формуле длины отрезка между парой точек;

2. Осуществляется приём радиосигналов на одну антенну, расположенную на летательном аппарате (точка $P(x_0, y_0, z_0)$ на рис. 2) и при помощи метода конического сканирования измеряются углы отклонения источника излучения от равносигнального направления ψ_m и углы между опорным направлением и направлением на проекции источника излучения φ_m , регистрируемые в точке P_0 приёмной антенной;

3. На основании измеренных углов ψ_m и φ_m определяются углы пеленга (3 пары углов азимута α и места ε) относительно каждого радиомаяка соответственно, при помощи выражений:

$$\alpha = \cos(\varphi_m) \psi_m, \quad \varepsilon = \sin(\varphi_m) \psi_m \quad (13)$$

4. Определяются 3 пары углов пеленга – углы азимута ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) и места ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) на ЛА относительно каждого радиомаяка при помощи метода конического сканирования;

5. При помощи углов пеленга составляются единичные векторы-направления на i -ые радиомаяки в связанной СК, а затем из них составляется квадратная матрица R_{cb} , определяющая положение ЛА относительно системы радиомаяков в связанной системе координат;

Единичные векторы-направления в связанной СК на i -ые радиомаяки определяются следующим образом:

$$\vec{r}_{cbi} = \begin{bmatrix} \sin \alpha_i \cos \varepsilon_i \\ \sin \varepsilon_i \\ \cos \alpha_i \cos \varepsilon_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

6. Определяется матрица направляющих косинусов C , которая представляет абсолютную ориентацию ЛА в пространстве. Для этого при помощи векторов-направлений $\vec{r}_{cbi}$ на i -ые радиомаяки составляется квадратная матрица R_{cb} , определяющая положение ЛА относительно системы радиомаяков в связанной системе координат:

$$R_{cb} = [\vec{r}_{cb1} \quad \vec{r}_{cb2} \quad \vec{r}_{cb3}] = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 & \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_2 & \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_3 \\ \sin \varepsilon_1 & \sin \varepsilon_2 & \sin \varepsilon_3 \\ \cos \alpha_1 \cos \varepsilon_1 & \cos \alpha_2 \cos \varepsilon_2 & \cos \alpha_3 \cos \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Матрица направляющих косинусов определяется при помощи выражения:

$$C = R_g \cdot R_{cb}^{-1} \quad (16)$$

На основании знания координат $ЛАМ_0(x_0, y_0, z_0)$ (т. е. координат вектора $\vec{r}_0$), и векторов-направлений $\vec{r}_i$ на радиомаяки рассчитываются единичные векторы $\vec{r}_{gi}$ и составляется матрица R_g , представляющая собой

матрицу составленную из векторов-направлений на радиомаяки в географической системе координат.

Так как матрица R_g может быть найдена при помощи матрицы направляющих косинусов C , которая представляет абсолютную ориентацию ЛА в пространстве, и матрицы, определяющей положение ЛА относительно системы радиомаяков в связанной системе координат R_{cb} , 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 подвижном объекте, в географической системе координат выглядит следующим образом (по формуле, определяющей единичный вектор):

$$\vec{r}_{gi} = \frac{\vec{r}_0 - \vec{r}_i}{|\vec{r}_0 - \vec{r}_i|}, \quad (17)$$

где $\vec{r}_{gi}$ – единичный вектор-направление, соединяющий антенну подвижного объекта и фазовый центр (равносигнальное направление) радиомаяка, $\vec{r}_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$ – радиус-вектор, отражающий пространственное положение подвижного объекта в географической системе координат, $\vec{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ – i -радиус-вектор, отражающий положение радиомаяков.

Запишем выражение (17) для каждого направления на радиомаяки в более удобном для дальнейших преобразований виде:

$$\vec{r}_{gi} = \begin{bmatrix} dx_{0i}l_i \\ dy_{0i}l_i \\ dz_{0i}l_i \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где $dx_{0i} = x_0 - x_i$, $dy_{0i} = y_0 - y_i$, $dz_{0i} = z_0 - z_i$ – координаты векторов-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.

Таким образом, матрица R_g имеет вид:

$$R_g = [\vec{r}_{g1} \quad \vec{r}_{g2} \quad \vec{r}_{g3}] = \begin{bmatrix} dx_{01}l_1 & dx_{02}l_2 & dx_{03}l_3 \\ dy_{01}l_1 & dy_{02}l_2 & dy_{03}l_3 \\ dz_{01}l_1 & dz_{02}l_2 & dz_{03}l_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Матрица R_{cb}^{-1} (обратная матрице R_{cb}) в выражении (16) определяется стандартным образом:

$$R_{cb}^{-1} = \frac{1}{|R_{cb}|} R_{доп. cb}^T, \quad (20)$$

где $R_{доп. cb}$ – матрица алгебраических дополнений для соответствующих элементов матрицы R_{cb} .

Определитель матрицы R_{cb} определяется следующим образом (из (15)):

$$|R_{cb}| = \cos \alpha_1 \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_2 \sin \varepsilon_3 - \cos \alpha_2 \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_1 \sin \varepsilon_3 -$$

$$- \cos \alpha_1 \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_3 \sin \varepsilon_2 + \cos \alpha_3 \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_1 \sin \varepsilon_2 + \\ + \cos \alpha_2 \cos \varepsilon_2 \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_3 \sin \varepsilon_1 - \cos \alpha_3 \cos \varepsilon_2 \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_2 \sin \varepsilon_1$$

Таким образом, матрица обратной R_{CB} , согласно (20), будет определяться следующим образом:

$$R_{CB}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{f_{00}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{01}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{02}}{|R_{CB}|} \\ \frac{f_{10}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{11}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{12}}{|R_{CB}|} \\ \frac{f_{20}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{21}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{22}}{|R_{CB}|} \end{bmatrix} \quad (21)$$

В выражении (21) коэффициенты f использованы для более короткой записи выражения, они определены следующим образом:

$$\begin{aligned} f_{00} &= \cos \alpha_2 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_3 - \cos \alpha_3 \cos \varepsilon_3 \sin \varepsilon_2, \\ f_{01} &= \cos \alpha_2 \cos \varepsilon_2 \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_3 - \cos \alpha_3 \cos \varepsilon_2 \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_2, \\ f_{02} &= \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_2 \sin \varepsilon_3 - \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_3 \sin \varepsilon_2, \\ f_{10} &= \cos \alpha_1 \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_3 - \cos \alpha_3 \cos \varepsilon_3 \sin \varepsilon_1, \\ f_{11} &= \cos \alpha_1 \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_3 - \cos \alpha_3 \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_1, \\ f_{12} &= \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \sin \varepsilon_3 - \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_3 \sin \varepsilon_1, \\ f_{20} &= \cos \alpha_1 \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2 - \cos \alpha_2 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_1, \\ f_{21} &= \cos \alpha_1 \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_2 - \cos \alpha_2 \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_1, \\ f_{22} &= \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \sin \varepsilon_2 - \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_2 \sin \varepsilon_1 \end{aligned}$$

С другой стороны, матрица векторов-направлений в географической системе координат при помощи матрицы направляющих косинусов C , которая представляет абсолютную ориентацию ЛА в пространстве, и матрицы, определяющей положение ЛА относительно системы радиомаяков в связанной системе координат R_{CB} .

$$R_g = C \cdot R_{CB} \quad (22)$$

Таким образом, существует определённая зависимость между углами пеленга и углами Эйлера-Крылова, из (22) следует:

$$dy_{01}l_1 \sin \theta + dx_{01}l_1 \cos \psi \cos \theta - dz_{01}l_1 \cos \theta \sin \psi = \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \quad (23)$$

$$dy_{02}l_2 \sin \theta + dx_{02}l_2 \cos \psi \cos \theta - dz_{02}l_2 \cos \theta \sin \psi = \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_2 \quad (24)$$

$$dy_{03}l_3 \sin \theta + dx_{03}l_3 \cos \psi \cos \theta - dz_{03}l_3 \cos \theta \sin \psi = \cos \varepsilon_3 \sin \alpha_3 \quad (25)$$

$$dx_{01}l_1(\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{01}l_1(\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \sin \theta) + dy_{01}l_1 \cos \gamma \cos \theta = \sin \varepsilon_1 \quad (26)$$

$$dx_{02}l_2(\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{02}l_2(\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \sin \theta) + dy_{02}l_2 \cos \gamma \cos \theta = \sin \varepsilon_2 \quad (27)$$

$$dx_{03}l_3(\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{03}l_3(\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \sin \theta) + dy_{03}l_3 \cos \gamma \cos \theta = \sin \varepsilon_3 \quad (28)$$

$$dx_{01}l_1(\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{01}l_1(\cos \gamma \cdot \cos \psi - \sin \gamma \sin \psi \sin \theta - dy_{01}l_1 \sin \gamma \cos \theta = \cos \alpha_1 \cos \varepsilon_1 \quad (29)$$

$$dx_{02}l_2(\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{02}l_2(\cos \gamma \cdot \cos \psi - \sin \gamma \sin \psi \sin \theta - dy_{02}l_2 \sin \gamma \cos \theta = \cos \alpha_2 \cos \varepsilon_2 \quad (30)$$

$$dx_{03}l_3(\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{03}l_3(\cos \gamma \cdot \cos \psi - \sin \gamma \sin \psi \sin \theta - dy_{03}l_3 \sin \gamma \cos \theta = \cos \alpha_3 \cos \varepsilon_3 \quad (31)$$

Тогда из выражений (23)-(31) можно выразить углы азимута и места, которые определяются при помощи конического сканирования во время азимутально-угломестного радиопеленгования:

$$\varepsilon_1 = \text{asin}[dx_{01}l_1(\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{01}l_1(\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \sin \theta) + dy_{01}l_1 \cos \gamma \cos \theta] \quad (32)$$

$$\varepsilon_2 = \text{asin}[dx_{02}l_2(\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{02}l_2(\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \sin \theta) + dy_{02}l_2 \cos \gamma \cos \theta] \quad (33)$$

$$\varepsilon_3 = \text{asin}[dx_{03}l_3(\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{03}l_3(\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \sin \theta) + dy_{03}l_3 \cos \gamma \cos \theta] \quad (34)$$

$$\alpha_1 = \text{asin}\left(\frac{dy_{01}l_1 \sin \theta + dx_{01}l_1 \cos \psi \cos \theta - dz_{01}l_1 \cos \theta \sin \psi}{\varepsilon_1}\right) \quad (35)$$

$$\alpha_2 = \text{asin}\left(\frac{dy_{02}l_2 \sin \theta + dx_{02}l_2 \cos \psi \cos \theta - dz_{02}l_2 \cos \theta \sin \psi}{\varepsilon_2}\right) \quad (36)$$

$$\alpha_3 = \text{asin}\left(\frac{dy_{03}l_3 \sin \theta + dx_{03}l_3 \cos \psi \cos \theta - dz_{03}l_3 \cos \theta \sin \psi}{\varepsilon_3}\right) \quad (37)$$

С другой стороны, азимут можно вычислить следующим образом

$$\alpha_1 = \text{acos}\left[\frac{dx_{01}l_1(\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{01}l_1(\cos \gamma \cdot \cos \psi - \sin \gamma \sin \psi \sin \theta) - dy_{01}l_1 \sin \gamma \cos \theta}{\cos \varepsilon_1}\right] \quad (38)$$

$$\alpha_2 = \text{acos}\left[\frac{dx_{02}l_2(\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{02}l_2(\cos \gamma \cdot \cos \psi - \sin \gamma \sin \psi \sin \theta) - dy_{02}l_2 \sin \gamma \cos \theta}{\cos \varepsilon_2}\right] \quad (39)$$

$$\alpha_3 = \text{acos}\left[\frac{dx_{03}l_3(\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \theta) + dz_{03}l_3(\cos \gamma \cdot \cos \psi - \sin \gamma \sin \psi \sin \theta) - dy_{03}l_3 \sin \gamma \cos \theta}{\cos \varepsilon_3}\right] \quad (40)$$

Подставляя (21) в (16) получим матрицу направляющих косинусов, из которой в дальнейшем будем определять параметры ориентации ЛА:

$$C = \begin{bmatrix} dx_{01}l_1 & dx_{02}l_2 & dx_{03}l_3 \\ dy_{01}l_1 & dy_{02}l_2 & dy_{03}l_3 \\ dz_{01}l_1 & dz_{02}l_2 & dz_{03}l_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{f_{00}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{01}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{02}}{|R_{CB}|} \\ \frac{f_{10}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{11}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{12}}{|R_{CB}|} \\ \frac{f_{20}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{21}}{|R_{CB}|} & \frac{f_{22}}{|R_{CB}|} \end{bmatrix} = \frac{1}{|R_{CB}|} \begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & c_{02} \\ c_{10} & c_{11} & c_{12} \\ c_{20} & c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (41)$$

где

$$\begin{aligned} c_{00} &= dx_{02}f_{10}l_2 - dx_{01}f_{00}l_1 - dx_{03}f_{20}l_3, \\ c_{01} &= dx_{01}f_{01}l_1 - dx_{02}f_{11}l_2 + dx_{03}f_{21}l_3, \\ c_{02} &= dx_{01}f_{02}l_1 - dx_{02}f_{12}l_2 + dx_{03}f_{22}l_3, \\ c_{10} &= dy_{02}f_{10}l_2 - dy_{01}f_{00}l_1 - dy_{03}f_{20}l_3, \\ c_{11} &= dy_{01}f_{01}l_1 - dy_{02}f_{11}l_2 + dy_{03}f_{21}l_3, \\ c_{12} &= dy_{01}f_{02}l_1 - dy_{02}f_{12}l_2 + dy_{03}f_{22}l_3, \\ c_{20} &= dz_{02}f_{10}l_2 - dz_{01}f_{00}l_1 - dz_{03}f_{20}l_3, \\ c_{21} &= dz_{01}f_{01}l_1 - dz_{02}f_{11}l_2 + dz_{03}f_{21}l_3, \\ c_{22} &= dz_{01}f_{02}l_1 - dz_{02}f_{12}l_2 + dz_{03}f_{22}l_3. \end{aligned}$$

Тогда искомые углы Эйлера-Крылова можно определить из найденной матрицы направляющих косинусов (41) для определённой ранее последовательности поворотов следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \gamma \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \operatorname{atan}\left(\frac{-c_{20}}{c_{00}}\right) \\ \operatorname{asin}(c_{10}) \\ \operatorname{atan}\left(\frac{-c_{12}}{c_{11}}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{atan}\left(\frac{-(dz_{02}f_{10}l_2 - dz_{01}f_{00}l_1 - dz_{03}f_{20}l_3)}{dx_{02}f_{10}l_2 - dx_{01}f_{00}l_1 - dx_{03}f_{20}l_3}\right) \\ \operatorname{asin}\left(\frac{dy_{02}f_{10}l_2 - dy_{01}f_{00}l_1 - dy_{03}f_{20}l_3}{|R_{CB}|}\right) \\ \operatorname{atan}\left(\frac{-(dy_{01}f_{02}l_1 - dy_{02}f_{12}l_2 + dy_{03}f_{22}l_3)}{dy_{01}f_{01}l_1 - dy_{02}f_{11}l_2 + dy_{03}f_{21}l_3}\right) \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} -\operatorname{atan}\left(\frac{dz_{01}f_{00}l_1 - dz_{02}f_{10}l_2 + dz_{03}f_{20}l_3}{dx_{01}f_{00}l_1 - dx_{02}f_{10}l_2 + dx_{03}f_{20}l_3}\right) \\ -\operatorname{asin}\left(\frac{dy_{01}f_{00}l_1 - dy_{02}f_{10}l_2 + dy_{03}f_{20}l_3}{|R_{CB}|}\right) \\ -\operatorname{atan}\left(\frac{dy_{01}f_{02}l_1 - dy_{02}f_{12}l_2 + dy_{03}f_{22}l_3}{dy_{01}f_{01}l_1 - dy_{02}f_{11}l_2 + dy_{03}f_{21}l_3}\right) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (42)$$

Полученные выражения (42) определяют абсолютную ориентацию в пространстве ЛА, на котором установлена приёмная антенна при помощи 3 разнесённых в пространстве радиомаяков.

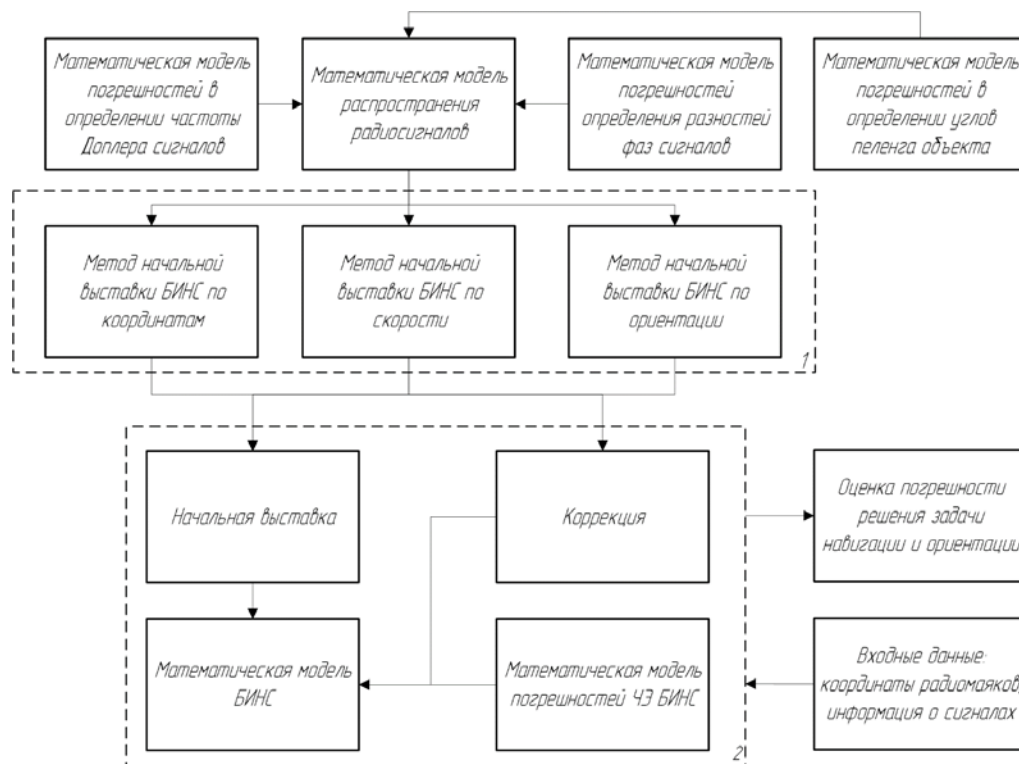


Рис. 3. Структурная схема общей математической модели начальной выставки и коррекции БИНС ЛА, 1 – методика начальной выставки БИНС ЛА в условиях воздействия РЭБ и ограниченном времени предстартовой подготовки, 2 – работа предлагаемой методики начальной выставки и коррекции БИНС на ЛА

Вычисления по (42) представляют собой метод начальной выставки и коррекции БИНС по ориентации, основанный на определении углов отклонения источника излучения от равносигнального направления и углов между опорным направлением и направлением на проекции источника излучения (радиомаяка), что позволяет вычислить единичные векторы направлений на радиомаяки, сформировать матрицу направляющих косинусов и, с использованием матрицы направляющих косинусов и матрицы

векторов направлений в географической системе координат, определить углы Эйлера-Крылова, представляющие абсолютную ориентацию ЛА в пространстве, обеспечивая высокую точность и надёжность измерений в условиях высокой маневренности.

Таким образом, разработана методика начальной выставки и коррекции БИНС, установленной на ЛА и функционирующей в сложных условиях, состоящая из метода начальной выставки БИНС и её коррекции по координатам с использованием фазовых интерферометрических измерений, метода начальной выставки БИНС и её коррекции по скорости при помощи информации об углах между направлением на антенну и вектор-базы пар радиомаяков и частоты принимаемого сигнала – частоты Доплера, метода начальной выставки БИНС и её коррекции по ориентации, используя только одну антенну, установленную на ЛА и системы расставленных радиомаяков и основанный на их пеленговании при помощи метода конического сканирования, в процессе полёта ЛА в сложных условиях.

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, pp. 111–114.
4. Способ начальной выставки БИНС высокоманевренного летательного аппарата по параметрам ориентации на подвижном основании. Балабаев О.С., Прохорцов А.В. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023, вып. 11, с. 84-87.
5. Способ определения навигационных параметров автоматического горного комбайна. Прохорцов А.В., Балабаев О.С. // Сборник материалов конференции XXX Юбилейная Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 2023, с. 31-33.
6. В. Н. Харисов. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС.
7. Сетевые спутниковые радионавигационные системы/В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцевич и др.; Под ред. В. С. Шебшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
8. Захарин Н. И., Захарин Ф. М. Кинематика инерциальных систем навигации. М.: Машиностроение, 1958. – 236 с, т. 2500, 6.1.

Балабаев Олег Сергеевич, ассистент, olezhkabalabaev@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Прохорцов Алексей Вячеславович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, proxav@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METHODOLOGY FOR IN-FLIGHT INITIAL ALIGNMENT AND CORRECTION OF AERIAL VEHICLE STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

O.S. Balabaev, A.V. Prokhortsov

In this article, methods for the initial alignment and correction of strapdown inertial navigation systems (SINS) for aerial vehicles (AV) are presented in scenarios where signals from satellite navigation systems are unavailable and pre-launch preparation time is limited. The proposed methodology is based on receiving signals from three radio beacons, allowing for the initial alignment and correction of SINS in terms of position, velocity, and orientation directly in flight. A mathematical model of this methodology has been developed. The proposed approach enhances AV navigation accuracy and may be beneficial in developing navigation systems for various types of highly maneuverable aerial vehicles.

Key words: SINS, AV, initial alignment, correction, phase interferometric measurements, Doppler frequency, conical scanning

Balabaev Oleg Sergeevich, assistant, olezhkabalabaev@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Prokhortsov Alexey Vyacheslavovich, doctor of technical sciences, head of department, proxav@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.032.26

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-53-54

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА И НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА НА БАЗЕ СЕТЕЙ РАДИАЛЬНО-БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ С РЕАЛИЗАЦИЕЙ АДАПТИВНОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА В НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Н.А. Беззубов, О.В. Горячев, С.В. Феофилов

В статье проводится сравнительный анализ нечеткого регулятора и нейросетевого регулятора на основе нейронных сетей радиально-базисных функций с реализацией адаптивного скользящего режима по быстродействию и точности. В качестве объекта управления рассмотрена нелинейная динамическая система «перевернутый маятник на каретке». Составлено математическое описание вывода закона адаптации параметров сравниваемых регуляторов и осуществлен выбор функции Ляпунова для обеспечения устойчивости системы по замкнутому контуру. Проведено компьютерное моделирование работы регуляторов в среде MATLAB.

Ключевые слова: нейросетевое управление, нечеткий регулятор, адаптивный скользящий режим, нейронные сети радиально-базисных функций, устойчивость по Ляпунову.

Введение. Использование любого метода управления может привести к различиям между реальным процессом и математической моделью, применяемой для создания регулятора. Эти различия могут быть

обусловлены немоделируемой динамикой процесса, изменением его характеристик, математическим упрощением поведения объекта управления при моделировании и другими факторами, влияющими на точность управления. Традиционные регуляторы эффективны только при точном определении всех параметров. Однако случайные параметры внешней среды невозможно предсказать заранее. Для улучшения качества управления в условиях воздействия неизвестных факторов можно применять регуляторы со скользящим режимом, адаптивные регуляторы с использованием теории нечётких множеств и другие интеллектуальные регуляторы [1].

Скользящий режим — это особый вид управления систем с изменяющейся структурой. Цель такого управления - контролировать состояние системы таким образом, чтобы оно оставалось в определенной окрестности поверхности переключения. Этот метод имеет два основных преимущества: 1) динамические процессы системы можно настроить с помощью выбора поверхности переключения; 2) реакция замкнутого контура становится абсолютно невосприимчивой к определенному типу неопределенностей. Эти свойства делают скользящий режим подходящим для управления, придающим свойства робастности системе.

Процесс проектирования регуляторов, работающих в скользящем режиме, состоит из двух этапов. Первый этап заключается в выборе поверхности переключения таким образом, чтобы обеспечить выполнение заданных технических требований. На втором этапе выбирается закон управления, который будет обеспечивать достижение переключающей функции переменными состояния системы [2].

В данной работе предлагается синтезировать адаптивный скользящий закон управления с помощью нечеткого вывода и нейронных сетей радиально-базисных функций для аппроксимационной оценки неизвестной составляющей нелинейной составляющей динамической системы.

Метод Ляпунова может быть использован для анализа устойчивости системы, что позволяет определить, насколько система устойчива к внешним воздействиям и как быстро она возвращается к равновесному состоянию после возмущений. Это может помочь в разработке оптимальных алгоритмов управления системы стабилизации [3].

Постановка задачи. Представим динамическую систему второго порядка (2) в следующем виде:

$$\ddot{\theta} = f(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta, \dot{\theta})u + d(t),$$

где f — неизвестная нелинейная функция, g — известная нелинейная функция, $u \in \mathbb{R}^n$ и $y \in \mathbb{R}^n$ — входной и выходной сигналы соответственно, $d(t)$ — внешние возмущения $|d(t)| \leq D$.

Примем эталонный сигнал за θ_d и определим невязку

$$e = \theta_d - \theta$$

Уравнение поверхности переключения

$$s = \dot{e} + ce$$

где $c > 0$, тогда

$$\dot{s} = \ddot{e} + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - f - gu - d(t) + c\dot{e} \quad (1)$$

Если f и d известны, мы можем сформировать закон управления:

$$u = \frac{1}{g}[-f + \ddot{\theta}_d + c\dot{e} + \eta \text{sign}(s)] \quad (2)$$

С учетом (2) перепишем (1)

$$\dot{s} = \ddot{e} + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - f - gu - d(t) + c\dot{e} = -\eta \text{sign}(s) - d(t)$$

Если $\eta \geq D$, то обеспечивается условие существования скользящего режима:

$$s\dot{s} = -\eta|s| - s \cdot d(t) \leq 0$$

Если $f(x)$ – неизвестна, следует оценить $f(x)$ с помощью аппроксимирующего алгоритма.

Синтез нечеткого регулятора для прямого адаптивного управления. Мы можем заменить $f(x)$ некоторой ее оценкой $\hat{f}(x)$ с помощью нечеткого вывода согласно [4]. Универсальная теорема аппроксимации описывается в этом случае такой последовательностью:

Шаг 1: для переменных $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ определим нечеткие правила $A_i^{l_i}, l_i = 1, 2, \dots, p_i$.

Шаг 2: используем $\prod_{i=1}^n p_i$ нечетких правил для формирования нечеткой системы $\hat{f}(x | \theta_f)$:

$$R^{(j)}: \text{Если } x_1 = A_1^{l_1} \text{ и } \dots \text{ и } x_n = A_n^{l_n} \text{ для } \hat{f} = E^{l_1, \dots, l_n}$$

где $l_i = 1, 2, \dots, p_i, i = 1, 2, \dots, n$.

Выход нечеткой системы:

$$\hat{f}(x | \theta_f) = \frac{\sum_{l_1=1}^{p_1} \dots \sum_{l_n=1}^{p_n} \bar{y}_f^{l_1, \dots, l_n} (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i))}{\sum_{l_1=1}^{p_1} \dots \sum_{l_n=1}^{p_n} (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i))} \quad (3)$$

где $\bar{y}_f^{l_1, \dots, l_n}$ функция принадлежности x_i . Все переменные состояния должны быть известны. Более того, если в измерении есть шум на выходе $y = x_1$, вычисление $\mu_{A_i^{l_i}}(x_i)$ претерпит серьезные изменения, как следствие нечеткая система будет некорректной.

Перепишем (3) в следующем виде

$$\hat{f}(x | \theta_f) = \hat{\theta}_f^T \xi(x)$$

где $\xi(x) - \prod_{i=1}^n p_i$ -мерный вектор-столбец, а $l_1, \dots, l_n$ – элементы вектора-столбца

$$\xi(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i)}{\sum_{l_1=1}^{p_1} \dots \sum_{l_n=1}^{p_n} (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i))}$$

Установим оптимальный параметр точности оценки неизвестной составляющей динамической системы следующим образом:

$$\theta_f^* = \arg \min_{\theta_f \in \Omega_f} (\sup |\hat{f}(x | \theta_f) - f(x)|)$$

Тогда f может быть выражена:

$$f = \theta_f^{*T} \xi(x) + \varepsilon$$

где x это входной сигнал нечеткой системы, $\xi(x)$ – вектор функций принадлежности, ошибка аппроксимации нечеткой системой ε . Выбрав вектор входа $x = [e \quad \dot{e}]^T$, выход нечеткой системы определится так:

$$\hat{f}(x | \theta_f) = \hat{\theta}_f^T \xi(x)$$

Закон управления запишется следующим образом:

$$u = \frac{1}{g} [-\hat{f} + \ddot{\theta}_d + c\dot{e} + \eta \text{sign}(s)] \quad (4)$$

Подставив (4) в (1), получим

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{\theta}_d - f - gu - d(t) + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - f - (-\hat{f} + \ddot{\theta}_d + c\dot{e} + \eta \text{sign}(s)) - d(t) + c\dot{e} = \\ &= -f + \hat{f} - \eta \text{sign}(s) - d(t) = -\hat{f} - d(t) - \eta \text{sign}(s) \end{aligned} \quad (5)$$

Ошибка оценки неизвестной составляющей динамики системы:

$$\tilde{f} = f - \hat{f} = \theta_f^{*T} \xi(x) + \varepsilon - \hat{\theta}_f^T \xi(x) = \tilde{\theta}_f^T \xi(x) + \varepsilon \quad (6)$$

где $\tilde{\theta}_f = \theta_f^* - \hat{\theta}_f$

Определим функцию Ляпунова:

$$L = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2} \gamma \tilde{\theta}_f^T \tilde{\theta}_f$$

где $\gamma > 0$.

Продифференцировав L с учетом (5) и (6), получим:

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s\dot{s} + \gamma \tilde{\theta}_f^T \dot{\tilde{\theta}}_f = s(-\hat{f} - d(t) - \eta \text{sign}(s)) - \gamma \tilde{\theta}_f^T \dot{\tilde{\theta}}_f = \\ &= s(-\tilde{\theta}_f^T \xi(x) - \varepsilon - d(t) - \eta \text{sign}(s)) - \gamma \tilde{\theta}_f^T \dot{\tilde{\theta}}_f = \\ &= -\tilde{\theta}_f^T (s\xi(x) + \gamma \dot{\tilde{\theta}}_f) - s(\varepsilon + d(t) + \eta \text{sign}(s)) \end{aligned}$$

Выберем закон адаптации:

$$\dot{\tilde{\theta}}_f = -\frac{1}{\gamma} s \xi(x)$$

Тогда $\dot{L} = s(\varepsilon + d(t) + \eta \text{sign}(s)) = -s(\varepsilon + d(t)) - \eta |s|$

Поскольку ошибка аппроксимации ε достаточно мала, мы можем достичь условия $\dot{L} \leq 0$.

Синтез нейрорегулятора на базе сетей радиально-базисных функций. Согласно универсальной теореме аппроксимации, нейронные сети радиально-базисных функций также могут использоваться для оценки неизвестной составляющей динамической системы [5]. Алгоритм вычисления будет следующим:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x_i - c_{ij}\|^2}{b_j^2}\right); \quad f = W^T h(x) + \varepsilon$$

где x – входные переменные для нейронной сети, i – количество входных переменных, j – количество нейронов в скрытом слое, $h=[h_1 \ h_2 \ \dots \ h_n]^T$ – выход функции Гаусса, W – значения весов нейронов, ε – ошибка нейронной сети, $\varepsilon \leq \varepsilon_N$.

Вектор входа определяется как $x=[e \ \dot{e}]^T$ и выход нейронной сети будет

$$\hat{f} = \hat{W}^T h(x)$$

где $h(x)$ – функция Гаусса нейронной сети.

Закон управления:

$$u = \frac{1}{g}[-\hat{f} + \ddot{\theta}_d + c\dot{e} + \eta \text{sign}(s)] \quad (7)$$

Подставим (7) в (1):

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{\theta}_d - \dot{f} - gu - d(t) + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - \dot{f} - (-\hat{f} + \ddot{\theta}_d + c\dot{e} + \eta \text{sign}(s)) - d(t) + c\dot{e} = \\ &= -\dot{f} + \hat{f} - \eta \text{sign}(s) - d(t) = -\dot{\tilde{f}} - d(t) - \eta \text{sign}(s) \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\tilde{f}(x) = f(x) - \hat{f}(x) = W^T h(x) + \varepsilon - \hat{W}^T h(x) = \tilde{W}^T h(x) + \varepsilon$$

Определим функцию Ляпунова:

$$L = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}\gamma \tilde{W}_f^T \tilde{W}_f$$

где γ – коэффициент адаптации, положительно определенная константа.

Учитывая (7) и (8), продифференцируем L .

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s\dot{s} + \gamma \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} = s(-\dot{\tilde{f}}(x) - d(t) - \eta \text{sign}(s)) - \gamma \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} = \\ &= s(-\tilde{W}^T h(x) - \varepsilon - d(t) - \eta \text{sign}(s)) - \gamma \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} = \\ &= -\tilde{W}^T (sh(x) + \gamma \dot{\tilde{W}}) - s(\varepsilon + d(t) + \eta \text{sign}(s)) \end{aligned}$$

Выберем закон адаптации:

$$\dot{\tilde{W}} = \frac{1}{\gamma} sh(x)$$

Тогда $\dot{L} = s(\varepsilon + d(t) + \eta \text{sign}(s)) = -s(\varepsilon + d(t)) - \eta |s|$.

Моделирование системы «перевернутый маятник на каретке».

Смоделируем динамику адаптивной к внешним возмущениям системы «перевернутый маятник на каретке» с применением сравниваемых выше алгоритмов.

Синтез закона управления перевернутым маятником является классической задачей. Система широко используется в качестве эталона для тестирования алгоритмов управления. Она состоит из двухколесной тележки, на оси которой закреплен обратный маятник. Для этой системы требуется сформировать управляющее воздействие, которое позволило бы обеспечить заданный закон движения тележки и стабилизировать положение маятника [6].

Динамика системы, не учитывающая нелинейности (упоры, люфт, трение) описывается уравнениями:

$$\ddot{x} = \frac{-m_p l \ddot{\theta} \cos \theta + m_p l \dot{\theta}^2 \sin \theta + F}{m_c + m_p}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-m_p g l \sin \theta + \frac{m_p^2 l^2 \dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta}{m_c + m_p}}{J - \frac{m_p^2 l^2 \cos^2 \theta}{m_c + m_p} + m_p l^2}$$

Параметры динамической системы «перевернутый маятник на тележке» приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры системы «перевернутый маятник на каретке»

F	Сила, приложенная к тележке по горизонтальной оси
m_c	Масса тележки
m_p	Масса маятника
$2l$	Длина маятника
J	Момент инерции маятника относительно центра масс
x	Положение тележки
θ	Угол отклонения маятника от вертикальной оси

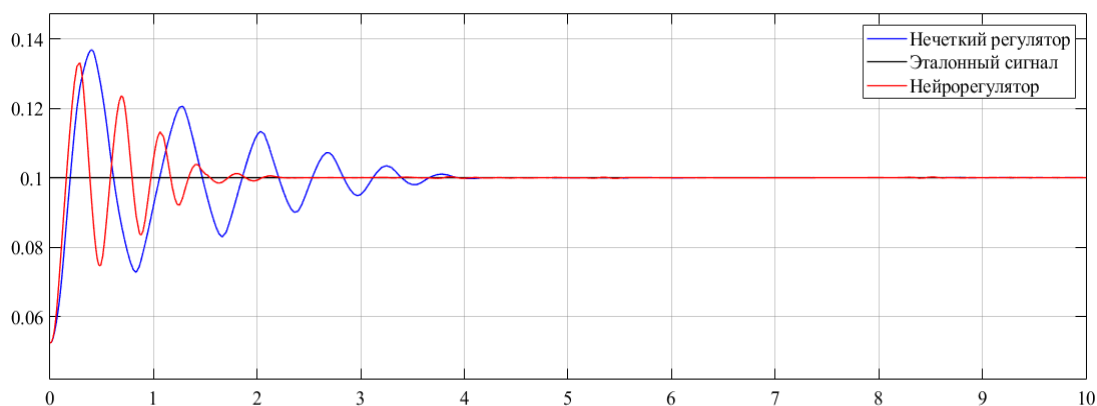


Рис. 1. Отработка ступенчатого сигнала

Перепишем уравнения (1) в виде:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{g \sin x_1 - \frac{m l x_2^2 \sin x_1 \cos x_1}{m_c + m_p}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m_p} \right)} + \frac{\frac{\cos x_1}{(m_c + m_p)}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m_p} \right)} u$$

Исходные данные для моделирования примем следующими: $g = 9.8$ м/с², $m_c = 1$ кг, $m_p = 0,1$ кг, $l = 0,5$ м. Результат моделирования представлен на рис. 1 и рис. 2. Фазовые портреты представлены на рис. 3.

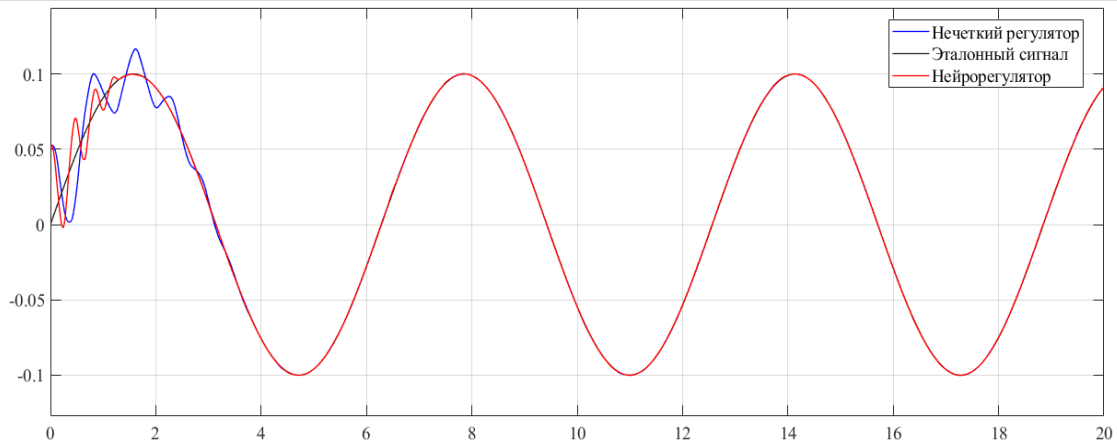


Рис. 2. Отработка гармонического сигнала

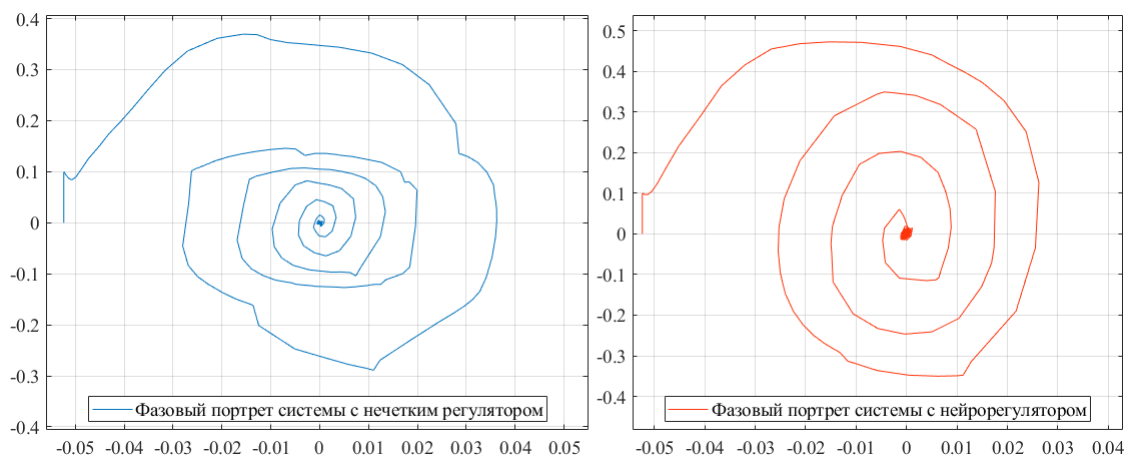


Рис. 3. Фазовые портреты

Сравнительный анализ проведем по четырем критериям оценки качества управления: время регулирования (примем 2%-ый коридор точности слежения), перерегулирование, СКО ошибки слежения и максимальная ошибка слежения (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительная таблица критериев качества работы регуляторов

	Нейрорегулятор (РБФ)	Нечеткий регулятор
Время регулирования, с	1,47	3,33
Перерегулирование, %	33	37
СКО ошибки	0,0053	0,0066
Максимальная ошибка, °	0,0262	0,0362

Закключение. Проведенное исследование показывает, что при одном фиксированном наборе входных переменных, отклик рассматриваемого в данной работе нелинейного динамического объекта при синтезе управляющего воздействия нейрорегулятором на базе сетей радиально-базисных функций наиболее точно воспроизводит эталонный сигнал в сравнении с регулятором нечеткого вывода на базе функций принадлежности гауссовых типов.

Список литературы

1. Ardashir Mohammadzadeh, Mohammad Hosein Sabzalian, Chunwei Zhang, Oscar Castillo, Rathinasamy Sakthivel, Fayez F. M. El-Sousy, Modern Adaptive Fuzzy Control Systems: Springer Nature Switzerland AG 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-17393-6>.
2. Yang Li, Jianhua Zhang, Qiong Wu Adaptive Sliding Mode Neural Network Control for Nonlinear Systems, Elsevier Inc. 2019.
3. Rosana C.B. Rego, Fábio Meneghetti U. de Araújo, Lyapunov-based continuous-time nonlinear control using deep neural network applied to underactuated systems, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 107, January 2022.
4. L.X. Wang, A Course in Fuzzy System and Control, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.
5. J. Park, I.W. Sandberg, Universal approximation using radial basis function networks, Neural Comput. 3 (2) (1991) 246-257.
6. Воевода А.А., Шипагин В.И. Синтез нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке // Научный вестник НГТУ том 79, № 2–3, 2020, с. 25–36.

Беззубов Никита Андреевич, аспирант, nikobezzubov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Горячев Олег Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, olegvqorsau@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Феофилов Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, svfeofilov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

COMPARATIVE ANALYSIS OF A FUZZY CONTROLLER AND A NEUROCONTROLLER BASED ON RADIAL-BASIS FUNCTIONS NEURAL NETWORKS WITH THE IMPLEMENTATION OF AN ADAPTIVE SLIDING MODE IN NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS

N.A. Bezzubov, O.V. Goryachev, S.V. Feofilov

The article provides a comparative analysis of a fuzzy controller and a neural network controller based on radial-basis functions neural networks with the implementation of an adaptive sliding mode in terms of speed and accuracy. The nonlinear dynamic system "inverted pendulum on a carriage" is considered as a plant. A mathematical description of the design of the law of adaptation of the parameters of the compared regulators is compiled and the Lyapunov function is selected to ensure the stability of the system in a closed loop. A computer simulation of the controllers in the MATLAB has been carried out.

Key words: neural network control, fuzzy controller, adaptive sliding mode control, radial basis function neural network, Lyapunov stability.

Bezzubov Nikita Andreevich, postgraduate, nikobezzubov@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Goryachev Oleg Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, olegvgorsau@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Feofilov Sergey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, svfeofilov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.032.26

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-61-62

СИНТЕЗ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА УСТОЙЧИВОГО ПО ЗАМКНУТОМУ КОНТУРУ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕТЕЙ РАДИАЛЬНО-БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ

Н.А. Беззубов, С.В. Феофилов

В работе представлен синтез нейрорегулятора на основе адаптивного скользящего режима управления с применением сетей радиально-базисных функций для компенсации влияния возмущений, действующих на объект. В качестве объекта рассматривается модель двигателя постоянного тока, учитывающая вязкое и сухое трение. Устойчивость замкнутого контура системы с достигается с помощью выбора подходящего кандидата функции Ляпунова.

Ключевые слова: нейронные сети радиально-базисных функций, адаптивный-скользящий режим, устойчивость по Ляпунову, двигатель постоянного тока, компенсация возмущений.

Введение. Актуальность развития прикладных методов проектирования высокоточных следящих систем обусловлена необходимостью обеспечения постоянно возрастающих требований по динамике, точности, энергопотреблению и помехозащищённости в условиях многокритериальности и неопределённости, такие как неполнота математического описания объекта, наличие существенных нелинейностей, изменение параметров в широких пределах неточности измерений переменных, произвольный характер начальных условий, задающих и возмущающих воздействий. Эти факторы требуют разработки и применения современных методов и алгоритмов управления, способных эффективно справляться с неопределённостью и обеспечивать высокую точность и надёжность работы следящих систем [1].

На данный момент решены многие важные вопросы синтеза следящих, включая управление с элементами искусственного интеллекта. Однако на практике сложно создать закон управления, оптимальный более чем по одному критерию. Опыт показывает, что ни один закон не удовлетворяет одновременно требованиям по быстродействию и точности. Поэтому для управления сложными системами целесообразно использовать комплексный закон, сочетающий достоинства нескольких подходов. Сочетание нескольких способов управления возможно в системах с переменной структурой (СПС). Однако при переключении режимов могут возникать

нежелательные движения, такие как колебания и потеря устойчивости. Чтобы избежать этих эффектов, функция переключения должна быть гладкой. Добиться этого классическими методами сложно, поэтому целесообразно использовать методы искусственного интеллекта, например, нейронные сети радиально-базисных функций (НСРБФ). Однако в этом случае исследование устойчивости весьма затруднительно [2].

В данной работе выполнена разработка нейросетевой системы управления следящим электродвигателем постоянного тока на основе адаптивного скользящего режима. Синтезированная система позволяет компенсировать возмущения в виде сил трения, действующих на объект, гарантируя при этом устойчивость системы управления. Для этого в работе используется адаптивный закон настройки параметров регулятора, построенный по второму методу Ляпунова [3].

Нейронные сети радиально-базисных функций. Нейронные сети радиально-базисных функций (RadialBasisFunctionNeural Network – RBFNN) были впервые предложены в работе [4]. Свое название сети получили из-за отличительной особенности в виде использования в качестве функций активации нейрона радиально-базисных функций вместо S-образных функций (гиперболический тангенс, сигмоида).

В данной работе в качестве радиально-базисной функции активации нейронов будем использовать функцию Гаусса (рис. 1).

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right), j=1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

где x – вектор входа; c_{ij} – вектор центра активационной функции нейрона; b_j – среднеквадратичное отклонение, характеризующее ширину радиально-базисной функции.

Синтез адаптивного управления на основе НСРБФ. Для синтеза предлагается использовать метод построения адаптивной системы управления на основе комбинации решения обратной задачи динамики и прямой компенсации нестационарностей с помощью нейросетевого адаптера, построенного по второму методу Ляпунова.

Составим передаточную функцию линейной модели 3-го порядка. Запишем дифференциальные уравнения привода без учёта ограничения тока:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= \omega \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M - d \\ M &= c_m i \\ L \frac{di}{dt} &= u - c_e \omega - Ri \end{aligned} \quad (2)$$

здесь φ – угловое положение вала двигателя, ω – угловая скорость вала двигателя, i – ток цепи якоря, J – момент инерции, приведенный к центру

вала, M – момент двигателя, L – индуктивность обмотки якоря, R – сопротивление цепи якоря, c_m – коэффициент по моменту, c_e – коэффициент противо-ЭДС, u – управляющее напряжение, $d = K_1\omega + K_2\text{sign}(\omega)$ – возмущающее воздействие, где K_1 – коэффициент вязкого трения, K_2 – коэффициент сухого трения.

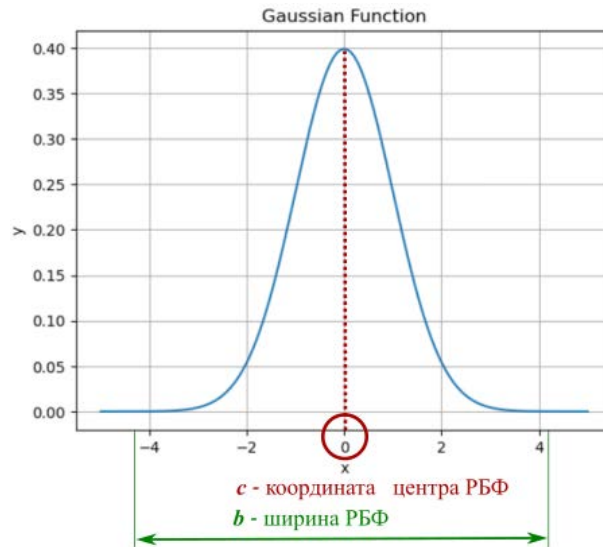


Рис. 1. График радиально-базисных функций Гаусса

Перепишем модель двигателя постоянного тока в форме Бруновского [8] с учетом параметров полученной передаточной функции:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{T^2}x_1 - \frac{2\xi}{T}x_2 + \frac{k}{T^2}u \\ y &= x_1\end{aligned}\quad (3)$$

где x_1 , x_2 – угловое положение и угловая скорость соответственно.

Примем за желаемое угловое положение φ_d , тогда ошибка слежения ДПТ:

$$\begin{aligned}e &= \varphi_d - \varphi \\ \dot{e} &= \dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}\end{aligned}\quad (4)$$

Представим динамическую систему (2) в следующем виде:

$$\ddot{\theta} = f(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta, \dot{\theta})u + d(t),$$

где f – неизвестная нелинейная функция, g – известная нелинейная функция, $u \in \mathbb{R}^n$ и $y \in \mathbb{R}^n$ – входной и выходной сигналы соответственно, $d(t)$ – возмущения $|d(t)| \leq D$.

Уравнение поверхности переключения:

$$s = \dot{e} + ce$$

где $c > 0$, тогда

$$\dot{s} = \ddot{e} + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - f - gu - d(t) + c\dot{e}\quad (5)$$

Если f и g известны, мы можем сформировать закон управления:

$$u = \frac{1}{g}[-f + \ddot{\theta}_d + c\dot{e} + \eta \text{sign}(s)] \quad (6)$$

С учетом (6) перепишем (5)

$$\dot{s} = \ddot{e} + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - f - gu - d(t) + c\dot{e} = -\eta \text{sign}(s) - d(t)$$

Если $\eta \geq D$, то обеспечивается условие существования скользящего режима:

$$s\dot{s} = -\eta|s| - s \cdot d(t) \leq 0$$

Если $f(x)$ – неизвестна, её следует оценить с помощью аппроксимирующего алгоритма.

Согласно универсальной теореме аппроксимации, нейронные сети радиально-базисных функций также могут использоваться для оценки неизвестной составляющей динамической системы [5]. Алгоритм вычисления будет следующим:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x_i - c_{ij}\|^2}{b_j^2}\right)$$

$$f = W^T h(x) + \varepsilon$$

где x – входные переменные для нейронной сети, i – количество входных переменных, j – количество нейронов в скрытом слое, $h = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_n]^T$ – выход функции Гаусса, W – значения весов нейронов, ε – ошибка нейронной сети, $\varepsilon \leq \varepsilon_N$.

Вектор входа определяется как $x = [e \ \dot{e}]^T$ и выход нейронной сети будет

$$\hat{f} = \hat{W}^T h(x)$$

где $h(x)$ – функция Гаусса нейронной сети.

Закон управления:

$$u = \frac{1}{g}[-\hat{f} + \ddot{\theta}_d + c\dot{e} + \eta \text{sign}(s)] \quad (10)$$

Подставим (7) в (1):

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{\theta}_d - f - gu - d(t) + c\dot{e} = \ddot{\theta}_d - f - (-\hat{f} + \ddot{\theta}_d + c\dot{e} + \eta \text{sign}(s)) - d(t) + c\dot{e} = \\ &= -f + \hat{f} - \eta \text{sign}(s) - d(t) = -\tilde{f} - d(t) - \eta \text{sign}(s) \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\tilde{f}(x) = f(x) - \hat{f}(x) = W^T h(x) + \varepsilon - \hat{W}^T h(x) = \tilde{W}^T h(x) + \varepsilon$$

Определим функцию Ляпунова:

$$L = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}\gamma \tilde{W}_f^T \tilde{W}_f$$

где γ – коэффициент адаптации, положительно определенная константа.

Учитывая (7) и (8), продифференцируем L .

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s\dot{s} + \gamma \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} = s(-\tilde{f}(x) - d(t) - \eta \text{sign}(s)) - \gamma \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} = \\ &= s(-\tilde{W}^T h(x) - \varepsilon - d(t) - \eta \text{sign}(s)) - \gamma \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} = \\ &= -\tilde{W}^T (sh(x) + \gamma \dot{\tilde{W}}) - s(\varepsilon + d(t) + \eta \text{sign}(s)) \end{aligned}$$

Выберем закон адаптации:

$$\dot{\tilde{W}} = \frac{1}{\gamma} sh(x)$$

Тогда $\dot{L} = s(\varepsilon + d(t) + \eta sign(s)) = -s(\varepsilon + d(t)) - \eta |s|$.

Пример моделирования. Смоделируем адаптивную систему, спроектированную выше. Схема адаптивного управления ДПТ представлена на Рис. 2.

За входной сигнал следящей системы примем синусоиду: $\varphi_d = A \sin \nu t$. Параметры адаптера: $\gamma = 10000$, $Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$. Начальные условия: $\varphi_0 = [0.1 \ 0]$. Параметры ДПТ представлены в таблице ниже.

Параметры ДПТ

Параметр	Переменная	Значение
Момент инерции	J	0.004 кг·м ²
Активное сопротивление цепи якоря	R	0.294 Ом
Индуктивность обмоток цепи якоря	L	0.0106 Н
Коэффициент сухого трения	K_1	6,5
Коэффициент вязкого трения	K_2	0,03
Коэффициент по моменту,	c_m	0.7 Н·м/А
Коэффициент против-ЭДС,	c_e	0.7 В·с/рад

Параметры радиально-базисных функций: $c = \begin{bmatrix} -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 \\ -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$,

$b = 2$.

Результаты моделирования представлены на рис. 2, 3.

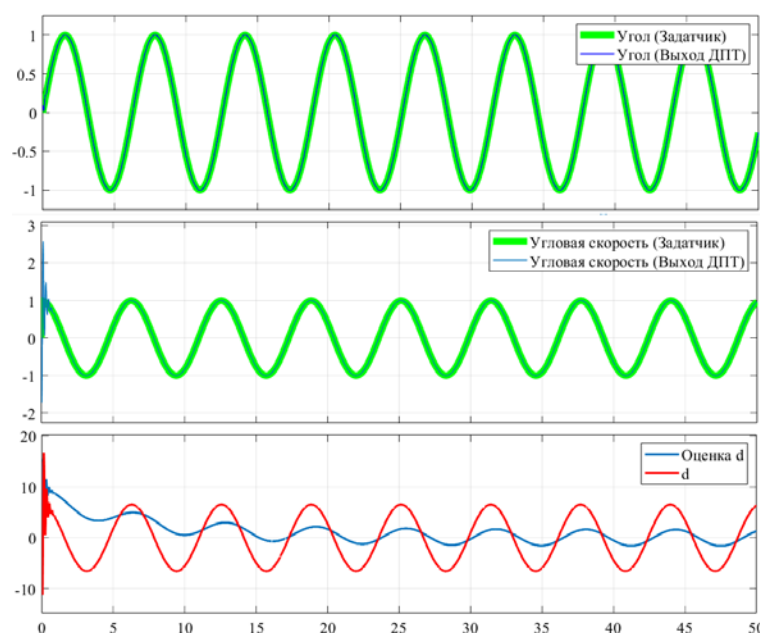


Рис. 2. Результат моделирования

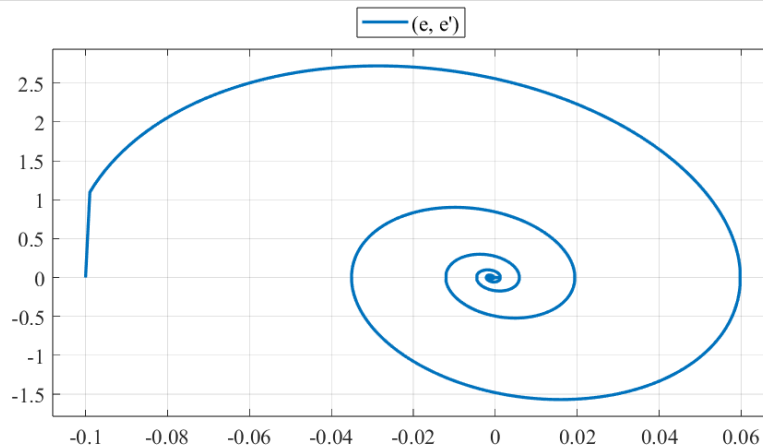


Рис. 3. Ошибка по углу и скорости

Легко видеть, что ДПТ отслеживает эталонный сигнал с экспоненциально сходящейся ошибкой слежения.

Заключение. Проведен синтез системы управления следящего электродвигателя постоянного тока на основе адаптивного скользящего режима, способная компенсировать влияние возмущающих воздействий. Компьютерное моделирование такой системы подтвердило ее способность компенсировать влияние сухого и вязкого трения с помощью нейронной сети радиальной базисных функций и обеспечивать требуемое качество управления.

Список литературы

1. О.В. Горячев, В.В. Воробьев, И.А. Меркулов, А.А. Шуркова, Разработка высокоточного следящего привода с интеллектуальным управлением: Известия ТулГУ. Технические науки. вып. 11, стр. 417-423, 2021. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-11-417-424.
2. Dhanasekar R., Srinivasan G., Marco Rivera, A novel higher-order sliding mode control for DC-DC boost converter system in PMDC motor exploring mismatched disturbances: Circuit World 50(2/3):348-364, 2024, DOI:10.1108/CW-06-2023-0144.
3. Abdal-Razak Shehab Hadi, Adnan Alamili, Sajjad Abbas A tracking control design for a DC motor using robust sliding mode learning control: International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS) 14(4):1937, 2023. DOI:10.11591/ijpeds.v14.i4.pp1937-1945.
4. D.S. Broomhead, D. Lowe, Multivariable functional interpolation and adaptive networks. Complex Syst. 2, 321–355 (1988).
5. Yang Li, Jianhua Zhang, Qiong Wu, Adaptive Sliding Mode Neural Network Control for Nonlinear Systems, Elsevier Inc., 2019 ISBN: 978-0-12-815372-7

Беззубов Никита Андреевич, аспирант, nikobezzubov@mail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Феофилов Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, svfeofilov@mail.ru,
Россия, Тула, Тульский государственный университет

SYNTHESIS OF A NEUROCONTROLLER OF A CLOSED-LOOP STABLE TRACKING
ELECTRIC DRIVE BASED ON AN ADAPTIVE SLIDING MODE USING RADIAL-BASIS
FUNCTIONS NEURAL NETWORKS

N.A. Bezzubov, S.V. Feofilov

The article presents the synthesis of a neurocontroller based on an adaptive sliding control mode using radial-basis functions neural networks to compensate for the influence of disturbances acting on the plant. The plant is a DC motor model that takes into account viscous and dry friction. The stability of the closed loop of the system is achieved by selecting a suitable candidate for the Lyapunov function.

Key words: radial basis function neural network, adaptive sliding mode control, Lyapunov stability, DC servo motor, compensation of disturbances.

Bezzubov Nikita Andreevich, postgraduate, nikobezzubov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Feofilov Sergey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, svfeofilov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.032.26

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-67-68

**МЕТОДИКА СИНТЕЗА АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА
ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
РАДИАЛЬНО-БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ
УСТОЙЧИВОСТИ ПО ЛЯПУНОВУ**

Н.А. Беззубов

В работе представлена методика синтеза адаптивного управления с применением нейронных сетей радиально-базисных функций для компенсации влияния изменения параметров объекта и возмущений. Устойчивость замкнутого контура системы с нейросетевым адаптером достигается с помощью выбора соответствующей функции Ляпунова. В качестве объекта рассматривается модель двигателя постоянного тока, учитывающая вязкое и сухое трение.

Ключевые слова: нейронные сети радиально-базисных функций, адаптивное управление, устойчивость по Ляпунову, двигатель постоянного тока, компенсация изменения параметров.

Введение. Двигатели постоянного тока (ДПТ) широко применяются в металлургии, машиностроении и робототехнике благодаря своей надежности и простоте конструкции. Традиционно для управления такими двигателями используются тиристорные преобразователи с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Однако, нестационарность характери-

стик двигателя, обусловленная изменением температуры обмоток, износом щеток и другими факторами, приводит к ухудшению качества переходных процессов [1].

На сегодняшний день существует достаточно большое количество научных исследований, посвященных повышению качества управления ДПТ в условиях параметрической неопределенности за счет адаптивной системы управления. В большинстве таких работ выполняется параметрическая настройка регуляторов в подчиненной системе управления. В частности, настройщики регуляторов контура скорости и контура тока могут строиться на базе искусственных нейронных сетей [2] и нечеткой логики [3]. Подобные подходы не позволяют в явном виде выделить немоделируемую динамику объекта управления, что позволило бы полностью ее скомпенсировать. Кроме того, для интеллектуальных подходов существует проблема оценки устойчивости получаемых решений.

К этой же группе работ относятся решения, полученные на основе второго метода Ляпунова [4]. Для подобных работ характерно отсутствие учета факта ограниченности сигнала управления, также учитывается лишь неопределенность момента инерции привода, но не, например, обмотки якоря.

В данной работе предлагается выполнить разработку адаптивной системы управления электродвигателем постоянного тока, которая позволяла бы учитывать ограничения на сигнал управления и компенсировать неопределенности в контурах тока и скорости, гарантируя при этом устойчивость системы управления. Влияние немоделируемой динамики предполагается скомпенсировать. Для этого в работе используется адаптер, построенный по второму методу Ляпунова и выполняющий аппроксимацию функции немоделируемой динамики с помощью нейронной сети радиально-базисной функции (НСРБФ).

НСРБФ, используемые в качестве универсального аппроксиматора нелинейной динамики объекта [5] во многих случаях превосходят в точности оценки сигнала аналоги в виде нейронных сетей с сигмоидной функцией активации [6].

Нейронные сети радиально-базисных функций. Нейронные сети радиально-базисных функций (RadialBasisFunctionNeural Network – RBFNN) были впервые предложены в работе [7]. Свое название сети получили из-за отличительной особенности в виде использования в качестве функций активации нейрона радиально-базисных функций вместо S-образных функций (гиперболический тангенс, сигмоида).

Радиально-базисные функции – специальный класс функций, значение которых монотонно уменьшается (увеличивается) с увеличением расстояния от центра. В данной работе будем использовать функцию Гаусса в качестве радиально-базисной функции активации нейронов (рис. 1).

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right), j=1, 2, \dots, m, \quad (12)$$

где x – вектор входа; c_j – вектор центра активационной функции нейрона; b_j – среднеквадратичное отклонение, характеризующее ширину радиально-базисной функции.

Нейронная сеть радиально-базисных функций (НСРБФ) содержит в наиболее простой форме три слоя: обычный входной слой, выполняющий распределение данных объекта для первого слоя весов; слой скрытых нейронов с радиально-симметричной активационной функцией; выходной слой.

Синтез адаптивного управления на основе НСРБФ. Для синтеза предлагается использовать метод построения адаптивной системы управления на основе комбинации решения обратной задачи динамики и прямой компенсации нестационарностей с помощью нейросетевого адаптера, построенного по второму методу Ляпунова.



Рис. 1. График радиально-базисных функций Гаусса

Составим передаточную функцию линейно модели 3-го порядка. Запишем дифференциальные уравнения привода без учёта ограничения тока:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= \omega \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M - K_1\omega - K_2 \text{sign}(\omega) \\ M &= c_m i \\ L \frac{di}{dt} &= u - c_e \omega - Ri \end{aligned} \quad (2)$$

здесь φ – угловое положение вала двигателя, ω – угловая скорость вала двигателя, i – ток цепи якоря, J – момент инерции, приведенный к центру вала, M – момент двигателя, K_1 – коэффициент вязкого трения, K_2 – коэффициент сухого трения, L – индуктивность обмотки якоря, R – сопротивление цепи якоря, c_m – коэффициент по моменту, c_e – коэффициент противо-ЭДС, u – управляющее напряжение.

Чтобы записать передаточную функцию системы (2), нужно взять преобразование Лапласа от уравнений (2) и решить систему управлений

относительно φ . Передаточная функция двигателя постоянного тока – это колебательное звено с интегратором:

$$\varphi = \frac{k}{s(T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1)} u$$

$$k = \frac{c_m}{(Rh + c_e c_m)}; T = \sqrt{\frac{JL}{Rh + c_e c_m}}; \xi = \frac{RJ + Lh}{2\sqrt{LI(Rh + c_e c_m)}}$$

Перепишем модель двигателя постоянного тока в форме Бруновского [8] с учетом параметров полученной передаточной функции:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{T^2} x_1 - \frac{2\xi}{T} x_2 + \frac{k}{T^2} u \\ y &= x_1\end{aligned}\quad (3)$$

где x_1, x_2 – угловое положение и угловая скорость соответственно.

Примем за желаемое угловое положение φ_d , тогда ошибка слежения ДПТ:

$$\begin{aligned}e &= \varphi_d - \varphi \\ \dot{e} &= \dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}\end{aligned}\quad (4)$$

Желаемое поведение ошибок (4) зададим устойчивым дифференциальным уравнением:

$$\ddot{e} = -k_d \dot{e} - k_p e \quad (5)$$

где k_p и k_d – коэффициенты характеристического полинома замкнутого контура ДПТ, выбранные таким образом, что корни характеристического полинома должны лежать в левой части комплексной плоскости. Тогда мы получаем экспоненциальную сходимость ошибок (4) к нулю.

С учетом (3) и (5) запишем закон управления двигателя постоянного тока, обеспечивающий экспоненциальную устойчивость системы по замкнутому контуру:

$$u = \frac{1}{g} (-f + \ddot{\varphi}_d + k_d \dot{e} + k_p e) \quad (6)$$

где $f = -(1/T^2)x_1 - (2\xi/T)x_2, g = k/T^2$

Если речь идет о параметрической неопределенности параметров двигателя постоянного тока, а f – изменяется с течением времени в зависимости от внешних условий.

Для оценки значения f в режиме реального времени воспользуемся нейронной сетью радиально-базисных функций (1):

$$\tilde{f} = \tilde{W}h, \quad (7)$$

где W – значения весовых коэффициентов, которые подбираются по адаптивному закону:

$$\dot{\tilde{W}} = -\gamma E^T P B h, \quad (8)$$

где γ – коэффициент адаптации, $E = (e \quad \dot{e})^T, P$ – решение уравнения Ляпунова:

$$A^T P + P A = -Q, \quad (9)$$

где A – матрица системы ДПТ, B – матрица управления, Q – положительно определенная симметричная матрица.

Выберем следующую функцию Ляпунова, при которой адаптивный закон (8) будет подбирать весовые коэффициенты НСРБФ обеспечивая экспоненциальную сходимость ошибки оценки $\tilde{f}$:

$$V = \frac{1}{2} E^T P E + \frac{1}{2} \gamma \bar{W}^T \bar{W}, \quad (10)$$

где $\bar{W} = \tilde{W} - \arg \min_{W \in x} (\sup [\tilde{f} - f])$ разница между оценочными значениями весовых коэффициентов и оптимальными значениями весов.

Производная (10) примет следующий вид:

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} E^T Q E + E^T P B [\tilde{f} - f] + \frac{1}{\gamma} \bar{W}^T (\dot{\tilde{W}} + -\gamma E^T P B h) \quad (11)$$

Подставив (8) в (11), получим $\dot{V} = -\frac{1}{2} E^T Q E + E^T P B [\tilde{f} - f]$, с выполнением условия $\dot{V} \leq 0$, что в свою очередь гарантирует устойчивость следящей системы по замкнутому контуру.

Пример моделирования. Смоделируем адаптивную систему, спроектированную выше. Схема адаптивного управления ДПТ представлена на Рис. 2.

За входной сигнал следящей системы примем синусоиду: $\varphi_d = A \sin \omega t$. Параметры адаптера: $\gamma = 10000$, $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$. Начальные условия: $\varphi_0 = [0.6 \quad 0]$.

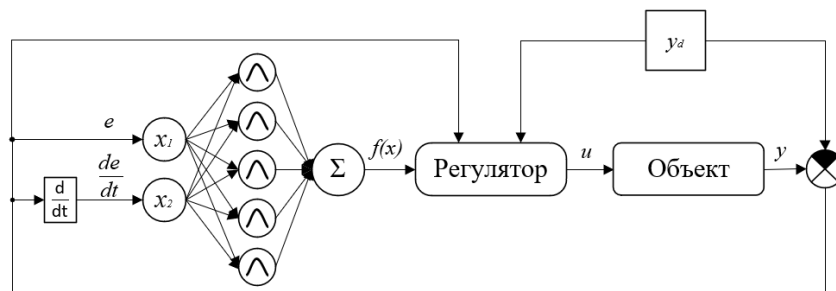


Рис. 2. Схема адаптивного управления ДПТ на основе НСРБФ

Параметры ДПТ представлены в таблице ниже

Параметры ДПТ

Параметр	Переменная	Значение
Момент инерции	J	0.004 кг·м ²
Активное сопротивление цепи якоря	R	0.294 Ом
Индуктивность обмоток цепи якоря	L	0.0106 Н
Коэффициент сухого трения	K_1	6,5
Коэффициент вязкого трения	K_2	0,03
Коэффициент по моменту,	c_m	0.7Н·м/А
Коэффициент противо-ЭДС,	c_e	0.7В·с/рад

Параметры радиально-базисных функций:

$$c = \begin{bmatrix} -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 \\ -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix},$$

$$b = 2.$$

Результаты моделирования представлены на рис. 3, 4.

Легко видеть, что ДПТ отслеживает эталонный сигнал с экспоненциально сходящейся ошибкой слежения.

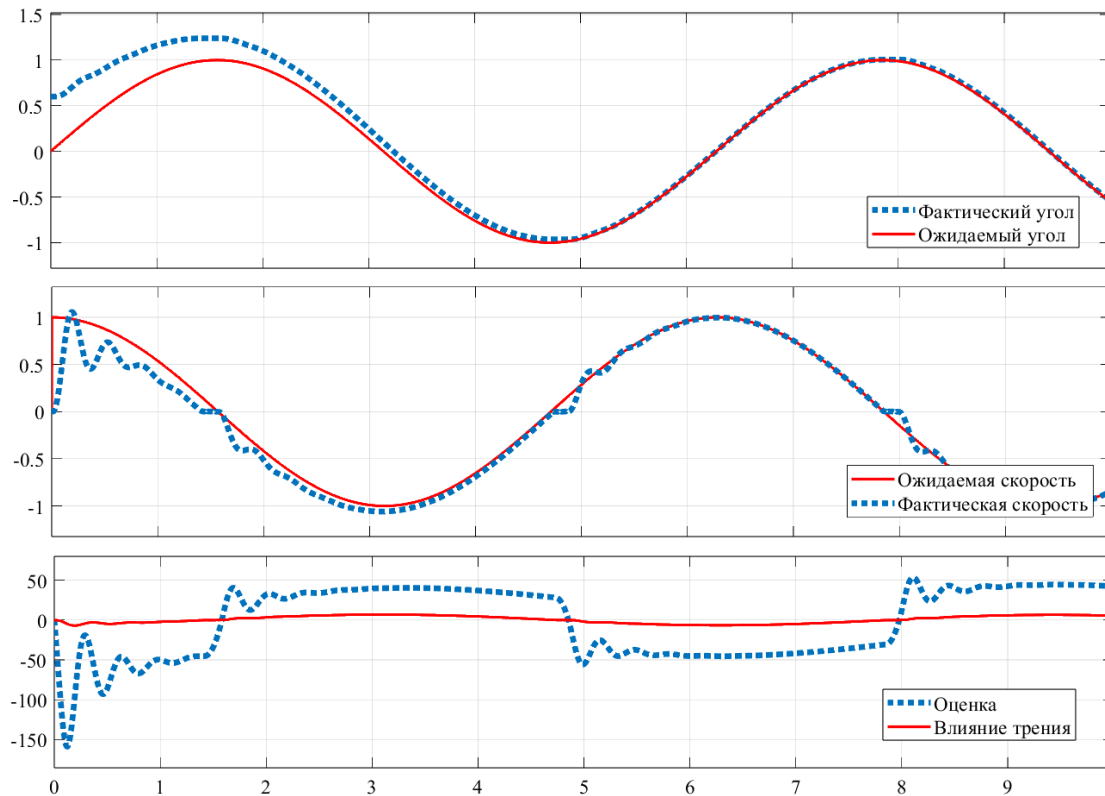


Рис. 3. Результат моделирования

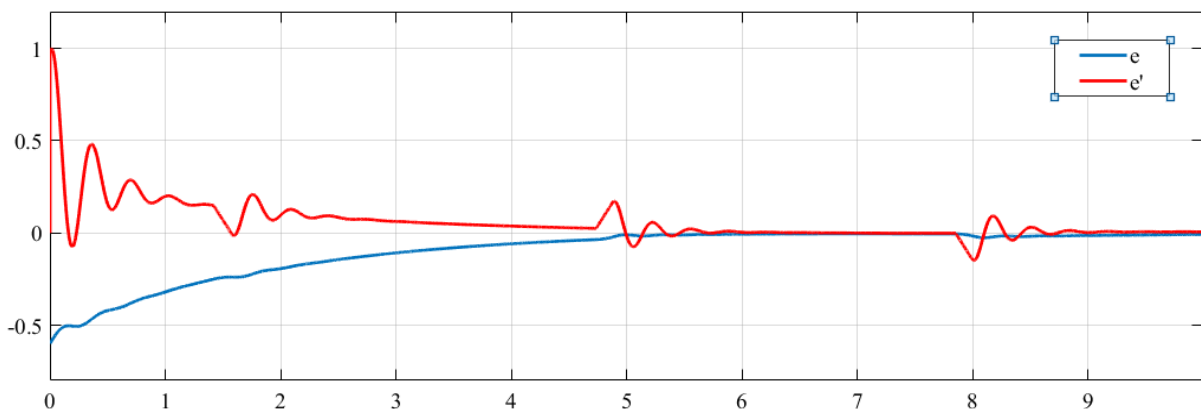


Рис. 4. Ошибка по углу и скорости

Закключение. Разработана адаптивная система управления двигателем постоянного тока, способная компенсировать влияние нестационарности его параметров на качество управления. Эксперименты по использова-

нию такой системы продемонстрировали ее способность компенсировать немоделируемую динамику с помощью нейронной сети радиальной базисных функций и обеспечивать требуемое качество управления. По сравнению с классической схемой модального управления, разработанная адаптивная система позволила обеспечить требуемое качество управления в условиях изменения параметров электродвигателя в ограниченном диапазоне относительно номинальных значений момента инерции двигателя постоянного тока.

Перспективным представляется направление совершенствования предложенной методики в оптимизации выбора параметров адаптера и радиальных базисных функций.

Список литературы

1. Глущенко А.И., Петров В.А., Ласточкин К.А., Повышение качества управления электродвигателем постоянного тока на основе его линеаризации и компенсации немоделируемой динамики: Управление большими системами. Выпуск 86, стр. 55-97, 2020.
2. Eremenko Y., Glushchenko A., Petrov V. Development of the method for joint operation of neural-network tuners for current and speed circuits // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, No. 9. P. 17–21.
3. Umesh K.B., Rakesh N. Speed Control of DC servo motor Using Fuzzy PID Controller // Advance in Electronic and Electric Engineering. – 2013. – Vol. 3, No. 9. – P. 1209–1220.
4. Sameh Abd-Elhaleem, Mohamed Hussien, Mohamed Hamdy, Tarek A. Mahmoud “Event-triggered model-free adaptive control for nonlinear systems using intuitionistic fuzzy neural network: simulation and experimental validation” Complex & Intelligent Systems 10(4), November 2023 DOI:10.1007/s40747-023-01254-6.
5. Park J., Sandberg L.W. Universal approximation using radial-basis-function networks. Neural Comput. 3(2). 1991. P. 246–257.
6. Беззубов Н.А., Феофилов С.В. “Нейросетевые эмуляторы для нелинейных динамических объектов” Известия ТулГУ. Технические науки, вып. 1, стр. 76-79, 2023.
7. D.S. Broomhead, D. Lowe, Multivariable functional interpolation and adaptive networks. Complex Syst. 2, 321–355 (1988).
8. Amjad J. Humaidi, Ibraheem Kasim Ibraheem, “Speed Control of Permanent Magnet DC servo motor with friction and measurement noise using Novel Nonlinear Extended State Observer Based Anti-Disturbance control”, Energies 12(9):1651, April 2019 DOI: 10.3390/en12091651.

Беззубов Никита Андреевич, аспирант, nikobezzubov@mail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

A METHOD FOR DESIGNING AN ADAPTIVE CONTROLLER USING RADIAL BASIS
FUNCTION NEURAL NETWORK FOR A DC SERVOMOTOR WITH LYAPUNOV
STABILITY

N.A. Bezzubov

The paper presents a methodology for the design of adaptive control using radial basis functions neural networks to compensate for the influence of changes in plant parameters and disturbances. The stability of a closed loop system with a neural network adapter is achieved by choosing the appropriate Lyapunov function. A DC servo motor model that takes into account viscous friction is considered as a plant.

Key words: radial basis function neural network, adaptive control, Lyapunov stability, DC servo motor, compensating control.

Bezzubov Nikita Andreevich, postgraduate, nikobezzubov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.37

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-74-75

**ОБЗОР АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ НАСТРОЙКИ
АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ**

Л.Д. Беленова

В статье описаны различные системы и устройства для автоматизированной настройки антенно-фидерных устройств, приведена таблица достоинств и недостатков. Настройка АФУ является критически важным процессом, который обеспечивает эффективную и надежную работу радиоэлектронных систем. Автоматизированные комплексы настройки АФУ позволяют добиться высокой точности, скорости и надежности настройки.

Ключевые слова: антенно-фидерное устройство, автоматизированный комплекс настройки, антенное согласующее устройство, калибровочная антенна.

Что такое антенно-фидерное устройство (АФУ)? В современное время они находят применение почти во всех аспектах нашей жизни, будь то радиолокация, мобильная связь, телекоммуникации, навигация, научные исследования и другие, все это не смогло бы работать без антенн с различными характеристиками, их основная функция заключается в преобразовании электромагнитных волн в электрические сигналы и наоборот. В ходе эволюции антенн они усложнялись, появлялись новые их виды, увеличивался диапазон выполняемых задач. Антенны часто превращались из простых устройств во взаимосвязанные системы, включающие в себя тысячи разнообразных компонентов.

С постоянно возрастающей сложностью антенных систем, повышались требования к точности экспериментальной отработки антенн, к контролю характеристик антенн на стадиях их создания и последующей

эксплуатации в составе радиотехнических систем. В связи с этим, возникла необходимость создания адекватных технических средств для выполнения настройки антенно-фидерное устройств. Среди совокупности настраиваемых параметров антенн наибольшую трудоемкость имеют их пространственных характеристик, такие как диаграмма направленности, коэффициент усиления, поляризация. Важность пространственных характеристик антенн обусловлена тем, что эти характеристики непосредственно влияют на основные эксплуатационно-технические параметры соответствующих радиотехнических систем. [1]

С повышением требований к антенным устройствам, растет трудоемкость операций настройки их характеристик. Для таких действий необходимы сложные технические средства - автоматизированные комплексы настройки АФУ (АКНАФУ). Вследствие больших объемов получаемой измерительной информации и сложных алгоритмов ее последующей обработки комплексы, предназначенные для настройки современных антенн, должны иметь высокую степень автоматизации.

Существуют различные типы автоматизированных комплексов настройки АФУ, каждый из которых предназначен для выполнения определенных задач и обладает своими уникальными характеристиками. Рассмотрим некоторые из них.

1. Антенное согласующее устройство (АСУ, антенный тюнер) — техническое средство, предназначенное для согласования параметров антенны с параметрами передатчика, приёмника или фидерной линии, выполненное в виде отдельного блока, устанавливаемого непосредственно у ввода антенны. При необходимости, с помощью АСУ производится также симметрирование антенны. [2]

Под согласованием подразумевается такое преобразование входного или выходного сопротивления антенны, чтобы оно было равно волновому сопротивлению питающего фидера, либо, при непосредственном подключении (без фидера), соответствовало оптимальной работе выходного устройства передатчика, входного устройства приёмника. Под симметрированием подразумевается устранение реактивной составляющей импеданса и обеспечение симметричного распределения сигнала.

Виды АСУ:

1. АСУ с перестраиваемыми параметрами - используются для узкого диапазона частот и состоят из катушек индуктивности и конденсаторов.

2. АСУ на основе цепей с распределёнными параметрами - применяются в метровом и дециметровом диапазонах волн и включают коаксиальные трансформаторы и реактивные шлейфы.

3. АСУ с ручной настройкой - используют переменные устройства, такие как конденсаторы переменной ёмкости и регулируемые автотрансформаторы.

4. АСУ с автоматической настройкой -автоматически настраиваются на оптимальные параметры антенны.

Для обзора рассмотрим подробно принцип работы АСУ с автоматической настройкой, которая работает на основе сложных алгоритмов и интеллектуальных средств измерения, обеспечивая автоматическое согласование параметров антенны с передатчиком или приёмником, структурная схема прибора приведена на рис. 1. [3, 4]

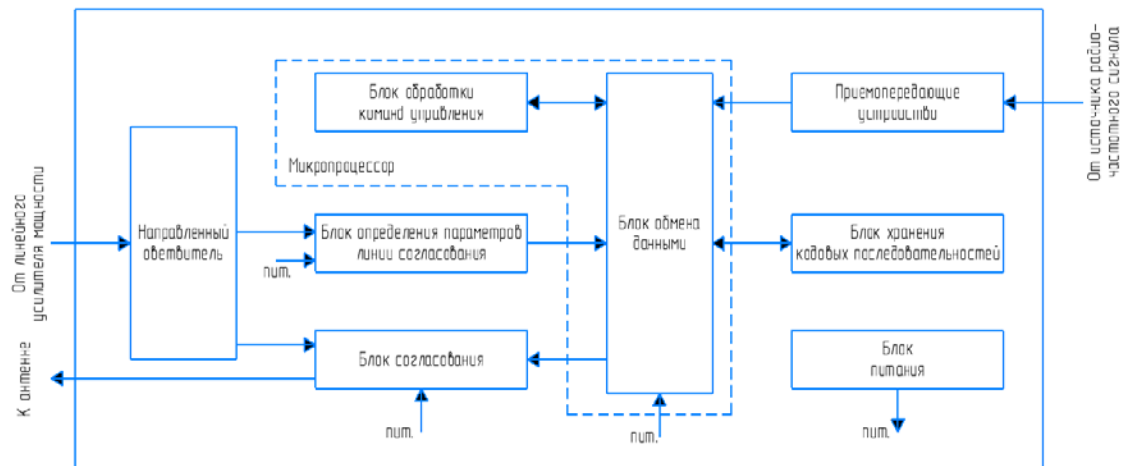


Рис. 1. Структурная схема работы АСУ

Основной принцип работы:

1. Измерение параметров - датчики фиксируют текущие параметры антенны и передаваемого сигнала. Эти данные передаются на промышленные контроллеры (ПЛК - выполняют задачи автоматического регулирования, пуска/остановки оборудования, аварийной защиты и отключения).

2. Обработка данных - контроллеры анализируют полученные данные и вырабатывают соответствующие сигналы управления для исполнительных механизмов.

3. Автоматическое согласование — сравниваются текущие параметры с заданными значениями и автоматически настраивают антенну для достижения оптимального согласования. В случае выхода параметров за предельные значения, контроллер сигнализирует об отказе оборудования или отклонении процесса, блокируя работу установки для предотвращения аварии.

4. Мониторинг и управление - диспетчер ведёт постоянное наблюдение за процессом производства и управляет работой агрегатов в дистанционном режиме. Информация о состоянии системы отображается на операторских станциях в режиме реального времени.

АСУ с автоматической настройкой включает сложные алгоритмы для анализа и планирования, предоставляет значительные преимущества, такие как высокая точность согласования и снижение потерь сигнала. Однако, перед внедрением данной технологии, необходимо учитывать высокие начальные затраты, сложность обслуживания и необходимость обеспечения безопасности системы.

2. Системы для автоматической калибровки антенн - представляют собой сложные технические решения, которые обеспечивают высокую точность и надежность настройки антенных систем. [5] Они могут использовать алгоритмы для компенсации искажений и оптимизации характеристик антенн. Рассмотрим работу таких систем [6-8].

2.1 Система автоматизированной калибровки следящих антенных систем, ее структурная схема представлена на рис. 2.[6]

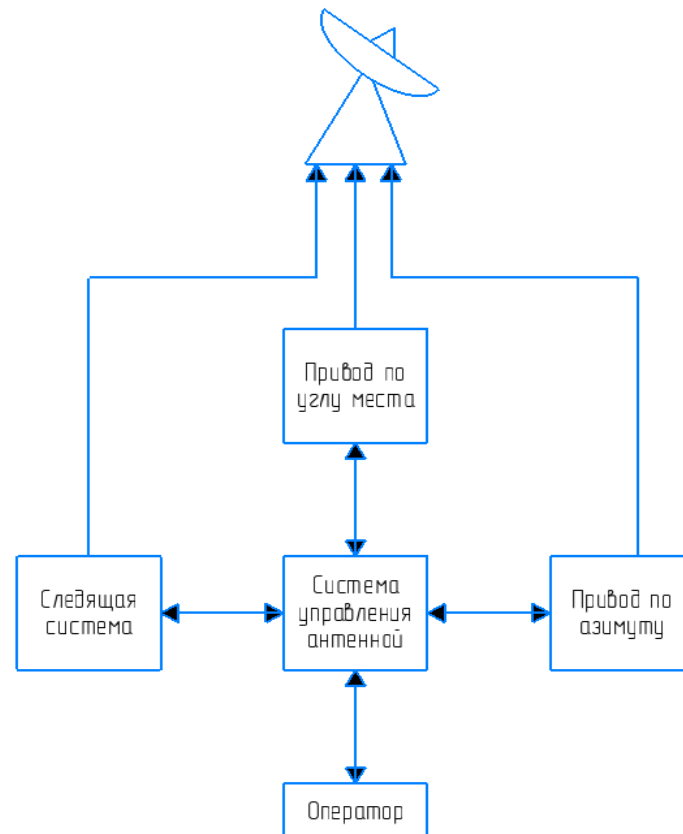


Рис. 2. Структурная схема работы калибровки следящих антенных систем

Основной принцип работы:

1. Определение калибровочной характеристики - система автоматически определяет калибровочную характеристику следящей антенной системы, что позволяет точно настроить её параметры.

2. Линейный диапазон измерений - калибровка проводится в линейном диапазоне измерений, где значение выходного сигнала следящей системы удовлетворяет выражению $a = k * b$, где a - отклонение следящей системы, k - постоянный коэффициент пропорциональности, b - отклонение источника сигнала от центра системы координат.

3. Калибровочная траектория - к программной траектории движения источника сигнала добавляется калибровочная траектория антенной решетки.

4. Автоматическое управление - главная ось антенной решетки движется по траектории за счет управляющих воздействий на привод по углу места и азимуту.

5. Периодичность измерений - измерения проводятся с заданной периодичностью, например, 10 раз в секунду.

2.2 Устройство для калибровки приемно-передающей АФАР - относится к области антенной техники и предназначено для калибровки приемных активных фазированных антенных решеток (АФАР), используемых в радиолокационных станциях (РЛС) дальнего обнаружения (рис. 3). [7]

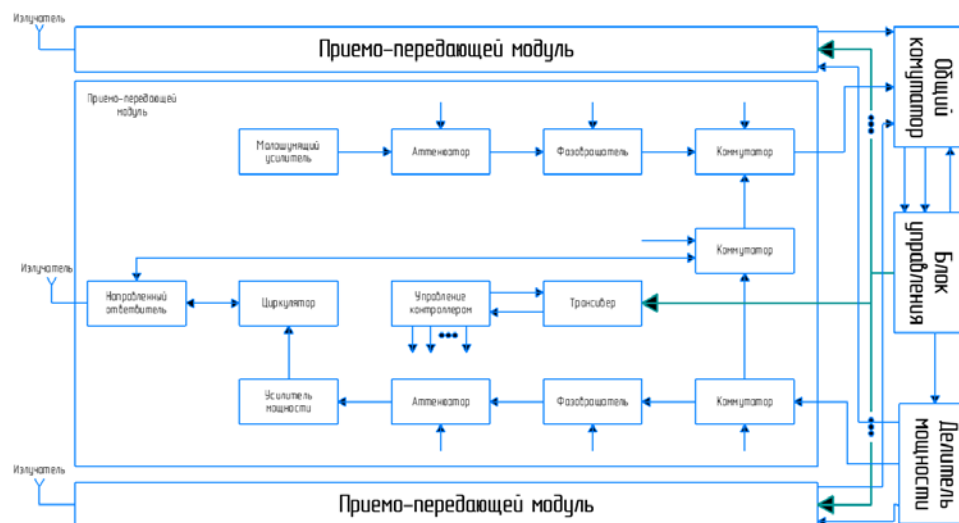


Рис. 3. Структурная схема работы устройства

Основной принцип работы:

1. Подача калибровочного сигнала - на вход каждого приемного модуля (ПМ) подается калибровочный сигнал в виде когерентной последовательности радиоимпульсов. Значение мощности этих сигналов выбирается одного порядка с мощностью сигналов, поступающих на входы ПМ при работе РЛС в штатном режиме.

2. Предварительное усиление и преобразование - сигналы усиливаются на несущей частоте. Затем они преобразуются на промежуточную частоту и усиливаются на этой частоте.

3. Аналого-цифровое преобразование - происходит аналого-цифровое преобразование с выделением квадратурных составляющих комплексных амплитуд выходных сигналов.

4. Когерентное суммирование - осуществляется последовательное когерентное суммирование квадратурных составляющих.

5. Вычисление калибровочных коэффициентов - комплексные калибровочные коэффициенты вычисляются путем сравнения комплексной амплитуды накопленного выходного сигнала нулевого ПМ, принятого за опорный, с комплексными амплитудами накопленных выходных сигналов калибруемых ПМ.

2.3 Устройство калибровки сверхвысокочастотного антенного измерительного комплекса ближней зоны — калибровать можно не только антенны, но и измерительные комплексы АФУ. Это можно использовать при оценке метрологических характеристик измерительного комплекса ближней зоны, в частности, для определения погрешностей измерений амплитудного и фазового распределений поля ближней зоны. Знание указанных характеристик позволяет повысить точность измерений амплитудных и фазовых диаграмм направленности, коэффициента усиления и координат фазового центра измеряемых апертурных антенн. Особенно значимый эффект может быть достигнут в тех случаях, когда испытаниям подвергаются крупногабаритные антенны, размеры которых измеряются метрами, веса от сотен килограмм до тонн, а измерения проводятся в СВЧ диапазоне частот. Схема устройства представлена на рис. 4. [8]

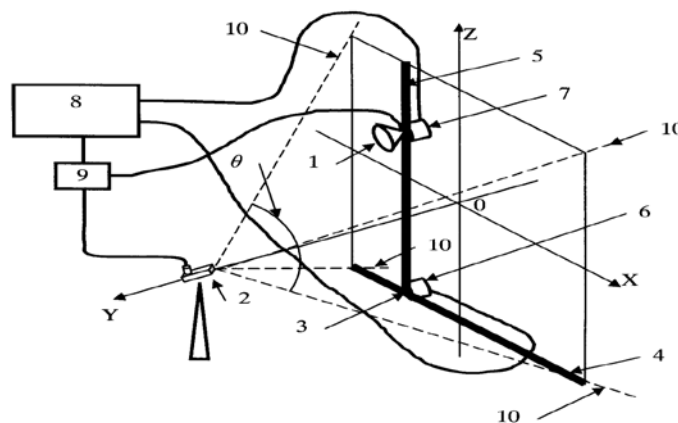


Рис. 4. Схема устройства: 1 - антенна-зонд; 2 -калибровочная антенна; 3 -сканер; 4 -горизонтальная направляющая; 5 -вертикальная направляющая; 6 -привод оси X; 7 -привод оси Z; 8 -центральный компьютер; 9 -приемно-передающие устройство; 10 -линии раскрытия калибровочной антенны;

Основной принцип работы:

1. Установка калибровочной антенны -калибровочная антенна с известными характеристиками устанавливается в фиксированном положении с электрической осью, направленной по нормали к плоскости сканирования.

2. Сканирование и позиционирование - антенна-зонд, установленная на плоском сканере, перемещается по заданной траектории, охватывая всю область сканирования. Приводы сканера управляются центральным компьютером, обеспечивая точное позиционирование антенны-зонда.

3. Измерение и анализ - центральный компьютер сопряжен с векторным анализатором цепей через приборный интерфейс. Радиочастотные кабели соединяют антенны с входами и выходами векторного анализатора цепей. Измерения проводятся путем замены измеряемой антенны на калибровочную антенну с известными характеристиками.

4. Компенсация погрешностей - полученные данные анализируются для оценки и компенсации погрешностей всех элементов измерительного комплекса. Это позволяет повысить точность антенных измерений и сократить время калибровки.

Системы для автоматической калибровки антенн обеспечивают высокую точность, надежность и быстроту настройки антенных систем. Они находят применение в различных областях, таких как радиосвязь, телекоммуникации, радиоастрономия и спутниковая связь, где точность и надежность работы оборудования играют ключевую роль.

3. Интегрированное автоматизированное рабочее место (АРМ) - включают в себя программное обеспечение и аппаратные средства для автоматического управления параметрами антенн, такими как частота, направление излучения, поляризация и тд. Это позволяет быстро и эффективно настраивать антенны в соответствии с требованиями конкретной задачи. [9-10] Состав АРМ может отличаться в зависимости от выполнения задач. Рассмотрим АРМ. для настройки крутизны, фазы и времени намагничивания фазовращателей в антеннах. [11-12]

АРМ с использованием безэховой камеры (рис. 5) - может быть использовано для измерения комплексных амплитуд возбуждения каналов фазированной антенной решетки, служит для настройки времени намагничивания фазовращателей, крутизны и фазы ФАР.

В состав могут входить различные устройства, но чаще всего он включает в себя несколько ключевых компонентов:

1. Безэховая камера -используется для минимизации внешних отражений и помех при измерении параметров АФУ, таких как диаграмма направленности (ДН). Может быть **миниатюрная (мини-БЭК) или стандартная (БЭК)**

2. Электромеханический модуль -включает в себя электрический привод, который обеспечивает точное позиционирование испытуемой антенны внутри БЭК. Это критически важно для точных измерений ДН.

3. Эталонная антенна - служит для сравнения и калибровки параметров испытуемой антенны.

4. Испытуемая антенна -подвергается настройке и испытаниям.

5. Генератор сигнала -генерирует сигнал заданной частоты и уровня.

6. Высокочастотный кабель -используется для передачи сигнала от генератора к испытуемой антенне и обратно.

7. Преобразователь частоты -конвертирует сигнал от генератора в нужный диапазон частот для работы с АФУ.

8. Персональная ЭВМ (ПК) -используется для ввода исходных данных для исследования, управления процессом измерений, обработки и анализа полученных данных.

9. Программное обеспечение (ПО) -включает в себя драйвер устройства сопряжения, программу, обеспечивающую интерфейсную часть, для визуализации данных и программу, обеспечивающую часть математических вычислений.

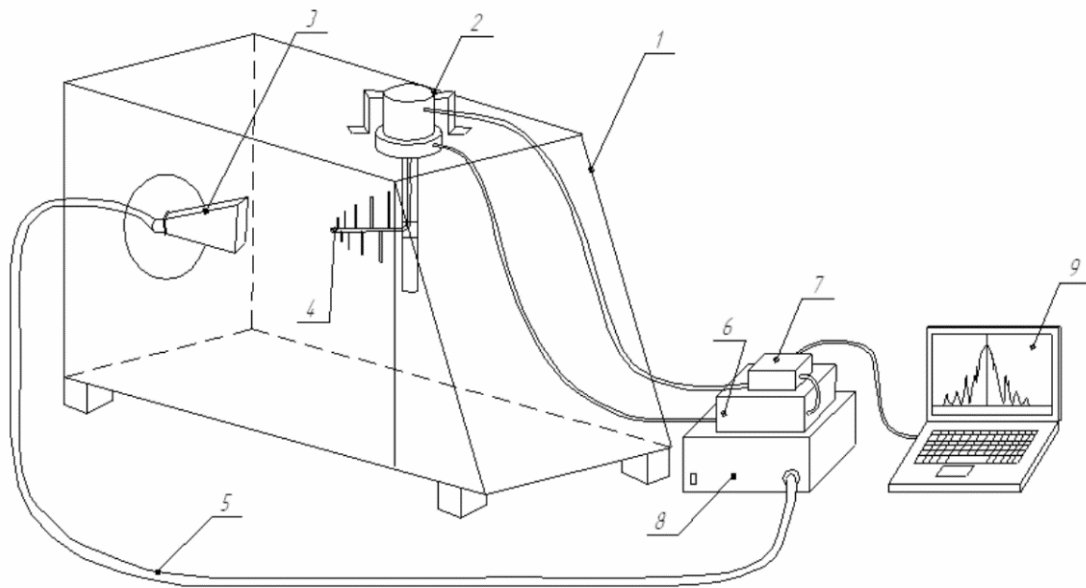


Рис. 5. Схема АРМ

Этот комплекс обеспечивает высокую точность измерений, быстродействие и возможность изменения конфигурации для адаптации под различные типы АФУ и условия испытаний. Рассмотрим основной принцип работы и структурную схему АРМ (рис. 6).

Основной принцип работы:

1. Генерация контрольного сигнала - неподвижный зонд генерирует контрольный сигнал сверхвысокой частоты.

2. Излучение и прием сигнала - контрольный сигнал излучается в направлении ФАР. Принятый сигнал усиливается и преобразуется на промежуточную частоту.

3. Преобразование сигнала в цифровой вид - аналоговый сигнал преобразуется в цифровой вид с помощью АЦП.

4. Поочередное переключение фазовращателей - ФАР поочередно переключается во все N -состояния фазовращателей каждого канала.

5. Вычисление дискретных преобразований Фурье - для каждого канала ФАР вычисляются дискретные преобразования Фурье с числом элементов от N_{min} до N . N_{min} выбирается из условия обеспечения длительности импульса установки фазового состояния, при которой вносимый фазовый сдвиг не превысит 360° .

6. Выбор результатов вычислений - из совокупности результатов вычислений выбирается результат, имеющий максимальное отношение амплитуды гармоники с самой большой амплитудой к сумме амплитуд остальных гармоник.

7. Определение комплексных амплитуд возбуждения - комплексные амплитуды возбуждения каналов ФАР равны соответствующим комплексным амплитудам гармоник дискретных преобразований Фурье с самой большой амплитудой.

8. Определение крутизны перестроочной характеристики - крутизна перестроочной характеристики фазовращателя i -го канала ФАР определяется по формуле: $S_i = 360^\circ / (\Delta\tau * N_i)$, где N_i - число элементов выбранного дискретного преобразования Фурье, соответствующее i -му каналу ФАР.

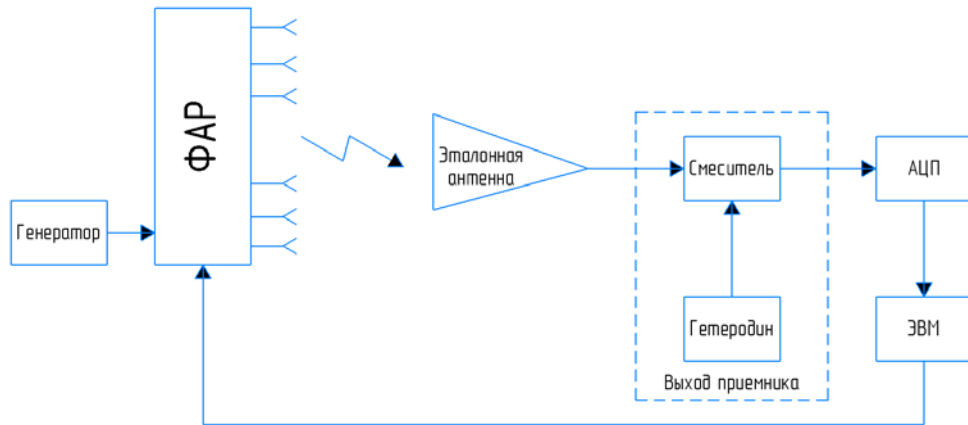


Рис. 6. Структурная схема АРМ

Это позволяет точно измерять комплексные амплитуды возбуждения каналов ФАР и крутизну перестроочной характеристики ферритовых фазовращателей, входящих в состав каналов ФАР.

4. Система для настройки удаленной антенны - позволяет точно и гибко управлять антенной из удаленного места. Она включает основной отражатель, вспомогательный отражатель с множеством исполнительных устройств и датчики для измерения сигнала. Основные компоненты устройства представлены на рис. 7. [13]

Основной принцип работы:

1. Основной отражатель и вспомогательный отражатель связаны между собой. Вспомогательный отражатель содержит множество исполнительных устройств, распределенных по его внешней поверхности.

2. Облучатель принимает передаваемый сигнал, который облучает основной отражатель через вспомогательный отражатель или передает передаваемый сигнал на основной отражатель через вспомогательный отражатель.

3. Каждое исполнительное устройство выполнено с возможностью локального деформирования поверхности вспомогательного отражателя, прилегающей к данному исполнительному устройству, в ответ на изменение положения исполнительного устройства.

4. Множество датчиков передаваемого сигнала размещаются в целевой зоне передаваемого сигнала, облучающего антенный узел.

5. Иницируется передача из антенного узла.

6. Измеряется и записывается уровень мощности передаваемого сигнала на каждом датчике из множества датчиков, а также местоположение соответствующего датчика.

7. Из записанных значений создается карта фактического пятна облучения, создаваемого антенным узлом.

8. Карта фактического пятна облучения сравнивается с требуемым пятном.

9. В по меньшей мере некоторые из исполнительных устройств подаются иницирующие сигналы для изменения кривизны вспомогательного отражателя таким образом, чтобы пятно облучения соответствовало требуемому пятну.

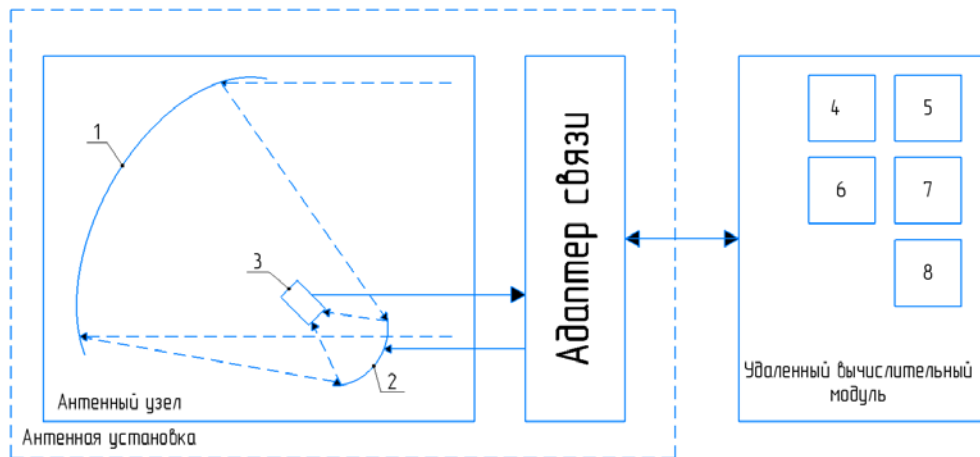


Рис. 7. Структурная схема устройства: 1 - отражатель; 2 - вспомогательный отражатель; 3 - облучающий элемент; 4 - контроллер; 5 - память; 6 - устройство ввода/вывода; 7 - носитель информации; 8 - операционная система

Таким образом, система для настройки удаленной антенны обеспечивает высокую точность и гибкость в настройке, что делает ее незаменимой в различных областях, где требуется точное управление сигналом.

5. Автоматическая юстировка антенн - позволяет существенно сократить время на юстировку антенн в горизонтальной и вертикальной плоскости на основе максимального уровня сигнала. Структурная схема представлена на рис. 8. [14]

Основной принцип работы:

1. Определение местоположения и высоты антенны:

Определение местоположения своей антенны с помощью спутниковой системы ГЛОНАСС или карты, если сигнал ГЛОНАСС отсутствует.

Определение высоты антенны над уровнем моря с помощью барометрического высотомера.

2. Ориентирование антенн:

Определение магнитного склонения и угла поворота антенны в горизонтальной плоскости относительно магнитного меридиана.

Ориентирование антенн станций в направлении друг друга, принимая относительный угол равным нулю.

3. Грубая юстировка в горизонтальной плоскости:

Антенна ведомой станции остается неподвижной и излучает тестовый сигнал. Ведущая станция осуществляет поворот своей антенны в горизонтальной плоскости в секторе $\pm 10^\circ$ с шагом 1° от относительного угла. Ведущая станция измеряет и запоминает максимальный уровень мощности сигнала от ведомой станции.

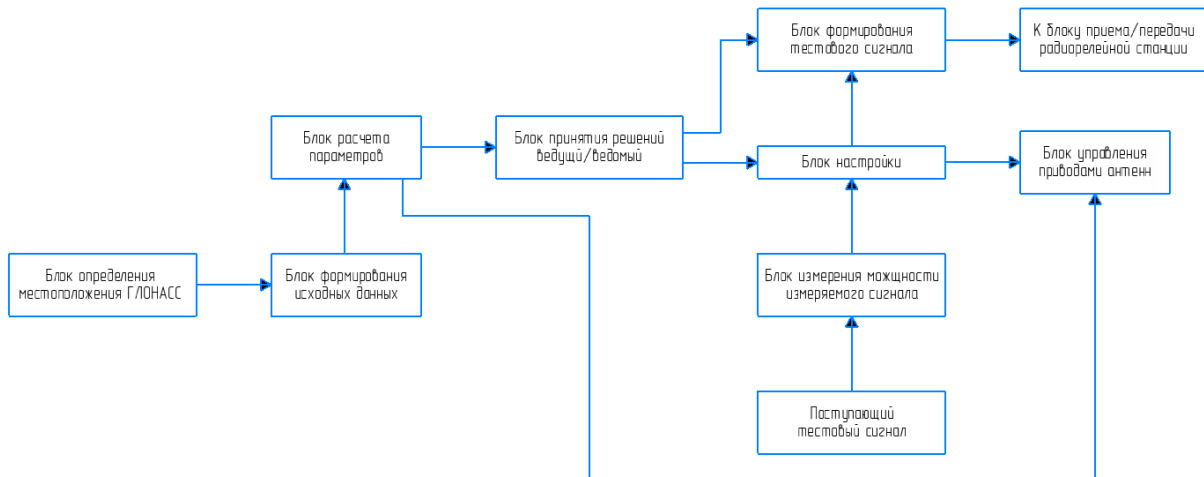


Рис. 8. Структурная схема

После прохождения полного сектора, ведущая станция поворачивает свою антенну на точный горизонтальный угол, соответствующий максимальному уровню сигнала.

Ведущая станция измеряет уровень мощности сигнала, поворачивая антенну на $0,5^\circ$ левее и правее значения точного горизонтального угла.

При нахождении более высокого уровня мощности, значение максимального уровня сигнала и точного угла обновляется, и антенна фиксируется в этом горизонтальном положении.

4. Точная юстировка в вертикальной плоскости:

Ведущая станция осуществляет поворот своей антенны в вертикальной плоскости в секторе $\pm 5^\circ$ с шагом $0,5^\circ$ от относительного угла. Ведущая станция измеряет и запоминает максимальный уровень мощности сигнала от ведомой станции.

После прохождения полного сектора, ведущая станция поворачивает свою антенну на точный вертикальный угол, соответствующий максимальному уровню сигнала.

Ведущая станция измеряет уровень мощности сигнала, поворачивая антенну на $0,25^\circ$ выше и ниже точного вертикального угла.

При нахождении более высокого уровня мощности, значение максимального уровня сигнала и точного вертикального угла обновляется, и антенна фиксируется в этом вертикальном положении.

5. Настройка ведомой станции - ведомая станция выполняет те же шаги, что и ведущая станция, но теперь антенна ведущей станции остается

неподвижной, а антенна ведомой станции осуществляет изменение своего положения в горизонтальной и вертикальной плоскости.

6. Сигнализация об окончании юстировки - после завершения настройки в обеих плоскостях, обе станции сигнализируют об окончании точной настройки.

В результате это позволяет сократить время на юстировку антенн в горизонтальной и вертикальной плоскости на основе максимального уровня принимаемого сигнала, что, в свою очередь, прямо повлияет на качество связи, организованной радиорелейной трассой, и скорость ее развертывания.

Основные достоинства и недостатки автоматизированных систем настройки АФУ приведены в таблице.

Основные достоинства и недостатки автоматизированных систем настройки АФУ

№ п/п	Название	Достоинства	Недостатки
1	Антенное согласующее устройство (АСУ)	Высокая точность согласования Снижение потерь сигнала Быстрая настройка Уменьшение человеческого фактора Широкая применимость	Высокие начальные затраты Сложность обслуживания Угроза кибератак Технические сбои Регулярное обновление
2.1	Система автоматизированной калибровки следящих антенных систем	Высокая точность Надежность Быстрота настройки Универсальность Экономическая эффективность	Высокие начальные затраты Сложность обслуживания Угроза кибератак Технические сбои Регулярное обновление
2.2	Устройство для калибровки приемно-передающей АФАР	Высокая точность калибровки Когерентное суммирование Аналого-цифровое преобразование	Сложность реализации Зависимость от когерентности Высокие затраты на оборудование Ограничения по применению
2.3	Устройство калибровки сверхвысокочастотного антенного измерительного комплекса ближней зоны	Высокая точность измерений Упрощение процесса калибровки Универсальность Улучшение электромагнитных характеристик	Сложность реализации Ограничения по частоте Высокая стоимость Ограничения по размеру полигона

3	АРМ с использованием безэховой камеры	Простота восприятия результатов анализа Адаптация к любому распределению входных данных Учет взаимодействий и взаимосвязей Анализ чувствительности Точность результатов	Проблема корреляции переменных Зависимость от количества итераций Отсутствие статистических ошибок Проблемы с учетом факторов, не имеющих количественный вид
4	Система для настройки удаленной антенны	Высокая точность настройки Дистанционное управление Гибкость	Сложность конструкции Необходимость калибровки Зависимость от датчиков
5	Автоматическая юстировка антенн	Высокая точность юстировки Автоматизация процесса Универсальность Повышение скорости развертывания	Сложность оборудования Зависимость от условий окружающей среды Погрешности измерений

Таким образом можно сделать вывод что настройка АФУ является критически важным процессом, который обеспечивает эффективную и надежную работу радиоэлектронных систем. А автоматизированные комплексы настройки АФУ позволяют добиться высокой точности, скорости и надежности настройки.

Список литературы

1. Страхов А.Ф. Автоматизированные антенные системы. М.: Радио и связь, 1985. 137 с.
2. Антенно-фидерные устройства / Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Советское радио, 1974. 535 с.
3. Патент № 2805996 Российская Федерация, МПК Н04В 1/04 (2006.01). Способ согласования антенно-фидерных СВЧ устройств в фидерном тракте. Заявка: 2023109032: заявл. 10.04.2023: опубл. 24.10.2023 / Генералов А. Г., Глухов В.И., Кокорин Д.А.
4. Патент № 204180 Российская Федерация, МПК Н03Н 7/38 (2006.01). Согласующее антенное устройство. Заявка: 2019116715: заявл. 28.12.2018: опубл. 13.05.2021 / Баранов С. И., Драгунов В. А., Кирьянов А. Д., Куров Д. Б., Круглов А. С.
5. Шишов Ю.А., Ворошилов В.А., Ясенков Т.В. Особенности калибровки приемных антенных решеток РЛС дальнего обнаружения. - Труды XXVIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» // Том 2, СПб, ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. С. 127-135.

6. Патент № 2524788 Российская Федерация, МПК G01S 7/40 (2006.01). Способ автоматизированной калибровки следящих антенных систем. Заявка: 201233934/07: заявл. 07.08.2012: опубл. 10.08.2014 / Соколов А.П., Соколова А.С.

7. Патент № 2647514 Российская Федерация, МПК H01Q 21/00 7/40 (2006.01). Способ и устройство для калибровки приемно-передающей активной фазированной антенной решетки. Заявка: 2016117568: заявл. 04.05.2016: опубл. 16.03.2018 / Шишов Ю.А., Подольцев В.В., Подъячев В.В., Губанов Д.В., Вахлов М.Г., Луцько И.С.

8. Патент № 130089 Российская Федерация, МПК G01R 35/00 (2006.01). Устройство калибровки сверхвысокочастотного антенного измерительного комплекса ближней зоны. Заявка: 2012131473/28: заявл. 27.07.2012: опубл. 10.07.2013 / Малай И.М.

9. Колесникова О.Н. Аппаратно-программный модуль для расчета и испытаний антенно-фидерных устройств // «Инженерный вестник Дона», 2007. Вып. 2. С. 32-36.

10. Колесникова О.Н. Автоматизированное рабочее место для расчета и испытаний антенных устройств, сборник докладов «Фундаментальные и прикладные проблемы современной техники», 2006 г.

11. Патент № 2575772 Российская Федерация, МПК G01R 29/10 (2006.01). Способ измерения комплексных амплитуд возбуждения каналов фазированной антенной решетки. Заявка: 2014147219/28: заявл. 24.11.2014: опубл. 20.02.2016 / Хомяков А.В., Курбатский С.А., Манаенков Е.В., Пушкина Л.Н.

12. Патент № 2807957 Российская Федерация, МПК G01R 29/10 (2006.01). Способ определения характеристик диаграммы направленности активной фазированной антенной решетки. Заявка: 2023124882: заявл. 28.09.2023: опубл. 21.11.2023 / Зайков К.Д., Аникин А.С., Захаров Ф.Н., Ярков К.А.

13. Патент № 2708908 Российская Федерация, МПК H01Q 15/14 (2006.01). Система, устройство и способ для настройки удаленной антенны. Заявка: 2017122883: заявл. 03.12.2015: опубл. 12.12.2019 / Спиртус Д., Итзаки-Тамир Р., Рокбергер Д.

14. Патент № 2806190 Российская Федерация, МПК H01Q 3/18 (2006.01). Способ юстировки антенн радиорелейных станций по максимальному уровню принимаемого сигнала. Заявка: 2023108532: заявл. 04.04.2023: опубл. 27.10.2023 / Кулешов С.А., Чернышов А.П., Кожевников А.А., Копытин П.О.

Беленова Любовь Даниловна, студент, belenova2014@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

OVERVIEW OF AUTOMATED ANTENNA-FEEDER DEVICE CONFIGURATION COMPLEXES

L.D. Belenova

Describes various systems and devices for automated configuration of antenna feeder devices and provides a table of advantages and disadvantages. AFU setup is a critical process that ensures efficient and reliable operation of radio electronic systems. And automated AFU configuration systems make it possible to achieve high accuracy, speed and reliability of settings.

Key words: antenna-feeder device, automated tuning complex, antenna matching device, calibration antenna.

Belenova Lyubov Danilovna, student, belenova2014@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 629.7.053: 577.38 + 19.688

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-88-89

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ

А.А. Наумова, Д.С. Соловьев, А.Ф. Индюхин,
А.С. Соколова, Е.А. Белоусова

В статье рассмотрен принцип действия нейроинтерфейса на основе мысленно произносимой вербальной команды. Совместно с системой управления подвижным объектом он может быть использован для коррекции траектории в процессе наведения. Приведена передаточная функция фильтров используемой модели обработки ЭЭГ. Представлены сравнительные записи биоэлектрической активности при мысленном проговаривании двух команд.

Ключевые слова: система управления, подвижный объект, когнитивные вызванные потенциалы, полосовой фильтр.

При разработке систем управления (СУ) подвижным объектом (ПО) (в первую очередь, систем телеуправления (ТУ) и систем телеориентирования (ТО)) возникает ряд проблем, среди которых можно выделить риск срыва управления при установке аппаратуры управления (АУ) на подвижном носителе и недостаточно гибкий закон управления при изменении обстановки в процессе наведения.

Вторая проблема возникает при необходимости совершения маневра подвижным объектом при использовании противником ложных целей, дымовой завесы, перенацеливании.

Для эффективного решения этой проблемы может быть рекомендовано использование нейроинтерфейса (НИ) в сочетании с алгоритмами искусственного интеллекта (ИИ) [1].

Ввиду специфики НИ, не позволяющей подавать одновременно две команды (по вертикальному и горизонтальному каналу), СУ объектом необходимо строить по радиусу отклонения.

Оператору, следящему за процессом наведения ПО на экране дисплея, кроме традиционного положения ПО относительно цели в картинной плоскости, предоставляется информация о текущем радиусе отклонения в виде вертикальной полосы. Ориентируясь на нее, он мысленно формирует команду на сближение с целью, либо на выполнение маневра в соответствующую сторону.

Точно также он может мысленно выдать команду "ПУСК" для следующего ПО после оценки сложившейся тактической обстановки.

При использовании в системе технологии НИ команда может быть осуществлена двумя способами: при помощи мысленного указания (основной) и вручную (запасной).

Для формирования мысленной команды используется нейроинтерфейс независимого типа, то есть паттерн электроэнцефалограммы (ЭЭГ) оператора изменяется в ответ на эндогенный стимул.

В рассматриваемом случае принятию решения соответствует произнесение мысленной вербальной команды. Известно, что нейрофизиологическим коррелятом произвольного внимания, формирования ориентировочного рефлекса, опознания, принятия решения являются так называемые когнитивные вызванные потенциалы (КВП) [2]. Они представляют собой процесс, происходящий во времени. Методика исследования КВП используется в медицине и психофизиологии [3, 4]. Основными генераторами КВП является ряд различных структур мозга, которые составляют морфологическую и нейрофизиологическую основу всех психических процессов. К таким структурам относятся: неспецифические ядра таламуса, теменные доли, медиобазальные отделы лобных долей коры головного мозга [2]. Особый интерес КВП приобретают в связи с разработками нейроинтерфейса – интерфейса «мозг-компьютер» (англ. BCI) [1]. Один из многочисленных способов уловить мысленную команду является получение единичной реализации КВП на внутренний или внешний стимул. Известен способ регистрации длиннотентного вызванного потенциала [5]. В основу способа положено использование полосового фильтра с передаточной функцией.

$$W_{\phi}(p) = \frac{\omega_{\Pi} p}{\omega_p^2 + \omega_{\Pi} p + p^2},$$

где ω_{Π} - полоса пропускания фильтра; ω_p - резонансная частота (РЧ) фильтра; p - оператор Лапласа.

Особенностью такой функции является то, что независимо от РЧ максимальный коэффициент передачи будет всегда равен единице. Это удобно, если из сигнала нужно выделить синусоидальную составляющую, частота которой заранее неизвестна, или меняется в ходе эксперимента. При этом возникает задача настройки ПФ - изменения РЧ. Поскольку частота доминирующего альфа-ритма у человека практически неизменна, настройка нейроинтерфейса сводится к одноразовому расчету РЧ.

В системе предлагается использовать метод регистрации ЭЭГ как основу для автоматического построения (в реальном масштабе времени) математической модели (ММ) фоновой ЭЭГ и определения параметров КВП как разницы между ЭЭГ и выходом ММ.

Основу ММ составляет рекуррентное уравнение цифрового селективного фильтра с настраиваемой резонансной частотой. Параметры фильтра автоматически изменяются в зависимости от частоты доминирующего ритма ЭЭГ.

Фильтрация происходит следующим образом: сигнал ЭЭГ подается на три последовательно соединенных селективных фильтра. Каждый из фильтров имеет исходную частоту настройки ω_p , соответствующую середине анализируемого частотного диапазона, например: тета, альфа, бета. Селективные фильтры автоматически настраиваются на частоту доминирующего ритма в выбранном частотном диапазоне периодометрическим методом: счетчики измеряют временные интервалы между моментами прохождения выходными сигналами фильтров максимумов и минимумов. Частота настройки ω_p рассчитывается как обратная величина по нескольким значениям измеренного периода.

По окончании настройки фильтров их параметры с заданным уровнем точности будут представлять сигнал фоновой ЭЭГ. Таким образом, разработанная адаптивная математическая модель позволяет отделить вызванную биоэлектрическую активность головного мозга от фоновой.

В нашем эксперименте регистрация ЭЭГ проведена с применением компьютерной диагностической системы «Нейрокартограф-5» (фирма МБН, г. Москва), установленной в Клинико-диагностическом центре Тульской областной клинической больницы. Получены записи фоновой активности и записи с когнитивной нагрузкой. Испытуемым на экране ноутбука предъявлялись слова "вверх", "вниз", "влево" и "вправо". Задание состояло в мысленном проговаривании написанного слова. В эксперименте участвовали студенты-спортсмены и суворовцы ТулСВУ.

В момент предъявления стимула импульсный генератор (выполнен на микроконтроллере stm32f103) по команде с ноутбука выдает синхроимпульс, который отображается на ЭЭГ.

На рис. 1 представлен наложенные друг на друга два участка записи ЭЭГ при предъявлении слов "влево" и "вправо".

Как видно из рис. 1, несмотря на открытые глаза испытуемого (сопровождается редукцией альфа-ритма), в паттерне ЭЭГ остатки ритмов присутствуют, хотя доминирует уже бета-ритм. То есть ММ должна обеспечивать определение доминирующего ритма автоматически. В перспективе дальнейшей разработки рассматриваются преимущественно каудальные отведения.

На рис. 2 представлены графики ЭЭГ в отведениях P_3 и P_4 при мысленном произнесении слов "влево" и "вправо". Даже без применения селективных фильтров заметны отличия между воспроизводимыми словами

в интервалах около 200 и 300 мсек, где и должны находиться характерные пики КВП.

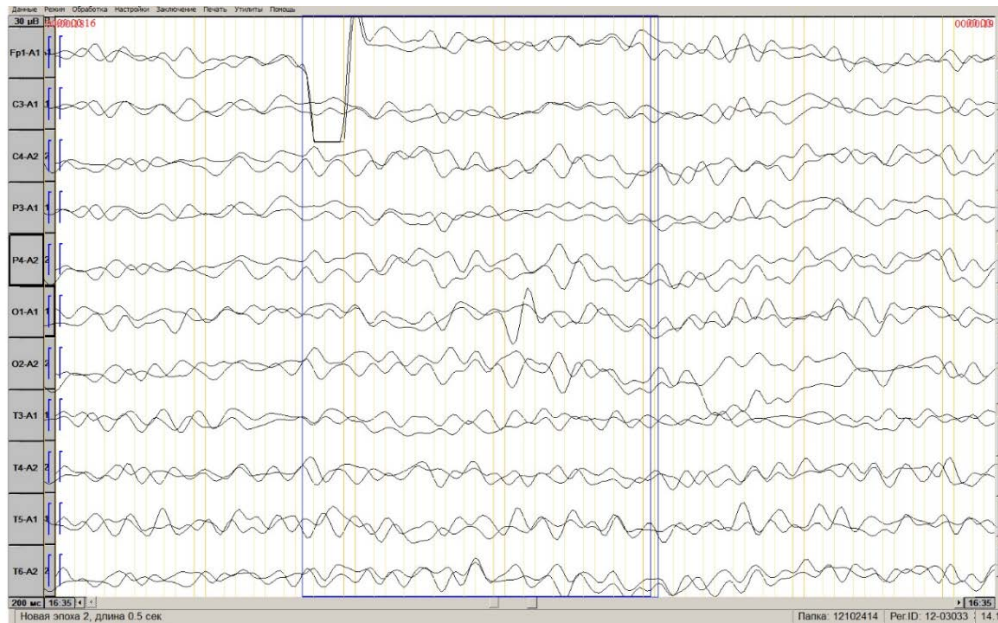


Рис. 1. Записи ЭЭГ испытуемого Б.: вертикальными курсорами выделен участок ≈ 500 мсек. Приведены графики процессов только в каудальных отведениях международной системы "10-20". На графике отведения Fp1 - шумовой сигнал, на который наложен синхромпульс

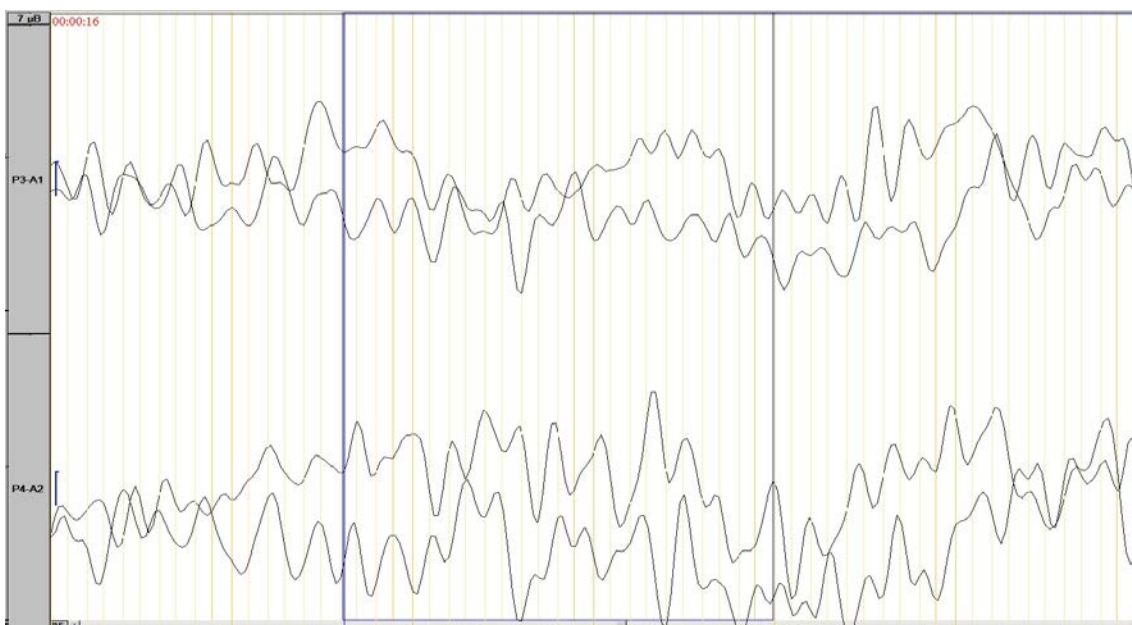


Рис. 2. Записи ЭЭГ испытуемого Б.: вертикальными курсорами выделен участок ≈ 500 мсек

Формирование соответствующей команды в реальном времени возможно при совокупном анализе всех рассматриваемых отведений в реальном времени, то есть с применением алгоритмов ИИ. Дополнительным

подспорьем может стать методика картирования КВП, основанная на определении координат мгновенного положения максимума биоэлектрической активности, предложенная в [6].

Таким образом, предложенный способ управления подвижным объектом с использованием нейроинтерфейса обеспечивает более высокую эффективность системы управления благодаря повышению возможностей коррекции процесса наведения оператором.

Предложенная схема нейроинтерфейса обеспечивает более высокое быстродействие и надежность благодаря использованию анализа биоэлектрической активности вербальных и моторных зон коры головного мозга.

Список литературы

1. Владимирский Б.М. Пути создания интерфейса «мозг – компьютер» (BCI) // Нейробиология и новые подходы к искусственному интеллекту и к науке о мозге. Тезисы трудов научной школы для молодежи. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 46 – 57.
2. Гнездицкий В.В. Вызванные потенциалы мозга в клинической практике. М.: Медпресс-информ, 2003. 264с.
3. Зенков Л.Р., Ронкин М.А. Функциональная диагностика нервных болезней. 5-е изд. М.: МЕДпресс-информ, 2013. 488 с.
4. Рутман Э.М. Вызванные потенциалы в психологии и психофизиологии. М., «Наука», 1979. – 213 с.
5. Хадарцев А.А. и др. Способ диагностики вызванного потенциала мозга и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2502466 от 27.12.2013 г.
6. Korzhuk N.L. et al. Mathematical modeling in cognitive process research // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol.1925. — P.012082 doi:10.1088/1742-6596/1925/1/012082.

Наумова Анна Андреевна, магистр, ind_a_f@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Соловьев Дмитрий Сергеевич, студент, ind_a_f@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Индюхин Алексей Федорович, канд. биол. наук, доцент, ind_a_f@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Соколова Ангелина Сергеевна, студент, ind_a_f@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Белоусова Евгения Алексеевна, сотрудник, ind_a_f@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ALTERNATIVE METHOD OF CONTROLLING A MOBILE OBJECT

A.A. Naumova, D.S. Soloviev, A.F. Indyukhin, A.S. Sokolova

The article discusses the operating principle of a neurointerface based on a mentally pronounced verbal command. Together with a moving object control system, it can be used to correct the trajectory during guidance. The transfer function of the filters of the EEG processing model used is given. Comparative records of bioelectrical activity during mental pronunciation of two commands are presented.

Key words: control system, mobile object, cognitive evoked potentials, bandpass filter.

Naumova Anna Andreevna, master, ind_a_f@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Solovyov Dmitry Sergeevich, student, ind_a_f@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Indyukhin Aleksey Fedorovich, candidate of biological sciences, docent, ind_a_f@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Sokolova Angelina Sergeevna, student, ind_a_f@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Belousova Evgeniya Alekseevna, employee, ind_a_f@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 620.17

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-94-95

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБЛИЦОВКОЙ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М.В. Житный, Э.Г. Синельников

Показаны результаты численного моделирования процесса разгона малоразмерной твердой частицы с помощью кумулятивного генератора с цилиндрической облицовкой. Приведены зависимости изменения скорости малоразмерной твердой частицы от времени при различных начальных условиях. Получены оценочные данные по максимальной скорости разгона малоразмерной твердой частицы цилиндрическим кумулятивным генератором.

Ключевые слова: малоразмерная твердая частица, высокоскоростное соударение, кумулятивный генератор, цилиндрическая облицовка.

Продолжительность периода активного существования космического аппарата (КА) определяется рядом различных факторов. Одним из таких факторов является способность КА выдерживать воздействие со стороны окружающей среды. Воздействие окружающей среды на КА обуславливается следующими основными процессами:

- радиационное воздействие;
- воздействие вакуума;
- воздействие солнечного излучения;
- резкие колебания температуры поверхности КА;
- ударное воздействие на поверхность и элементы КА частиц космического мусора (КМ) и метеороидов.

Следует отметить, что ударное воздействие на поверхность КА частиц КМ или метеороидов, в отличие от других видов воздействия, может приводить к быстрому сокращению срока активного существования КА или даже к мгновенному выходу его из строя[1]. Это обусловлено высокой энергией, которой обладают частицы КМ в силу своей высокой скорости. Поэтому исследование последствий данного вида воздействия является актуальной практической задачей[2].

Реализация натурного моделирования процессов, происходящих при высокоскоростном соударении, является достаточно нетривиальной задачей в силу необходимости придания имитатору частицы КМ высокой скорости. Для этого используются различные виды ускорителей, косновым из которых можно отнести следующие:

- легкогазовые ускорители;
- электромагнитные ускорители;
- взрывные ускорители.

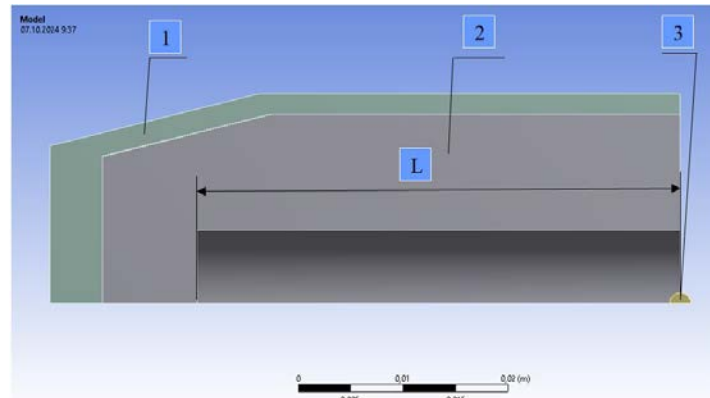


Рис. 1. Модель генератора с цилиндрической облицовкой, 1 –цилиндрическая облицовка, 2 – кумулятивный генератор с цилиндрической облицовкой, 3 –МТЧ

По сравнению с другими видами ускорителей взрывные ускорители, в зависимости от конструкции, способны обеспечить придание имитатору частицы КМ более высоких скоростей обладая при этом меньшими габаритными размерами. В предыдущих работах [3,4] были рассмотрены некоторые виды взрывных ускорителей (генераторов).

Данная работа продолжает исследования, проведенные в [4], в ходе которых моделировался процесс разгона имитатора частицы КМ с помощью взрывного генератора с цилиндрической облицовкой [5,6].

Обобщенная схема моделируемой установки и ее основные элементы приведены на рис.1.

Целью настоящей работы являлось оценивание влияния начального положения имитатора частицы КМ на его максимальную скорость.

Численное моделирование проводилось с применением специально-го программного обеспечения конечно-элементного анализа ANSYS.

Общие начальные условия численного моделирования:

- форма имитатора частицы КМ: сфера;
- диаметром имитатора частицы КМ: 2 мм;
- материал имитатора частицы КМ: сталь;
- взрывчатое вещество – октол (смесь гексогена и тротила. Состояние октола и поведение его продуктов детонации описывается уравнением Джонсона – Уилкинса – Ли (JWL)[7]);
- диаметр кумулятивного генератора с цилиндрической облицовкой – 40 мм;
- длина цилиндрической выборки генератора: 46 мм;
- диаметр цилиндрической выборки генератора: 12 мм.

Моделирование проводилось с использованием расчетного модуля ExplicitDynamics. Поведение исследуемых тел в ходе моделирования описывалось на основе подхода Эйлера.

Численное моделирование проводилось для следующих положений имитатора частицы КМ относительно тыльного среза цилиндрической выборки: $L_1 = 8,6$ мм; $L_2 = 18,6$ мм; $L_3 = 36$ мм; $L_4 = 46$ мм (срез генератора) (рис.1,2,3); $L_5 = 50$ мм; $L_6 = 70$ мм.

Разгон имитатора частицы КМ осуществляется за счет воздействия на него продуктов взрывчатого превращения.

Примеры визуализации процесса воздействия продуктов взрывчатого превращения на имитатор частицы КМ, а также распределение скорости движения продуктов взрывчатого превращения для случая $L_4 = 46$ мм (срез генератора), полученные в ходе моделирования, представлены на рисунках 2 и 3.

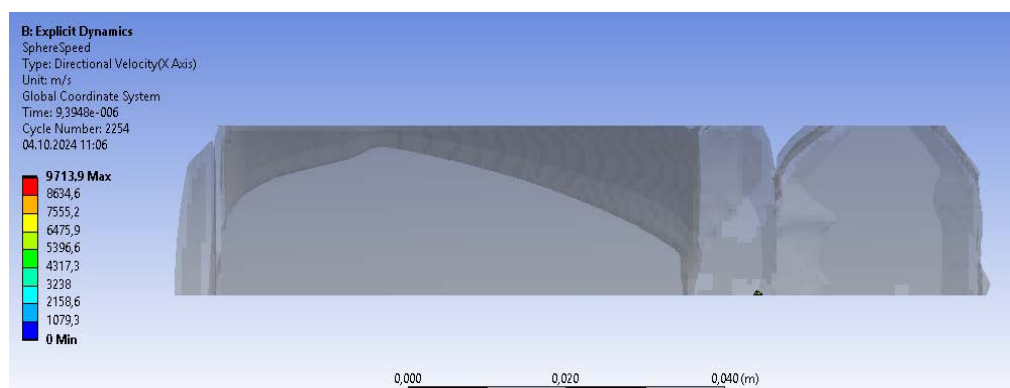


Рис. 2. Процесс воздействия продуктов взрывчатого превращения на имитатор частицы КМ ($t = 0,93$ мкс)

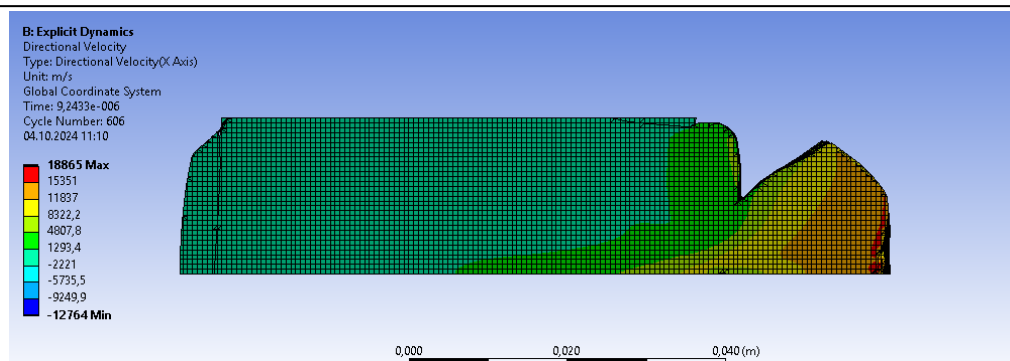


Рис. 3. Распределение значений скорости продуктов взрывчатого превращения ($t = 0,92 \mu\text{с}$)

Значения максимальной скорости, полученные в ходе численного моделирования движения имитатора частицы КМ в условиях воздействия на него продуктов взрывчатого превращения заряда генератора с цилиндрической облицовкой, представлены в табл. 1.

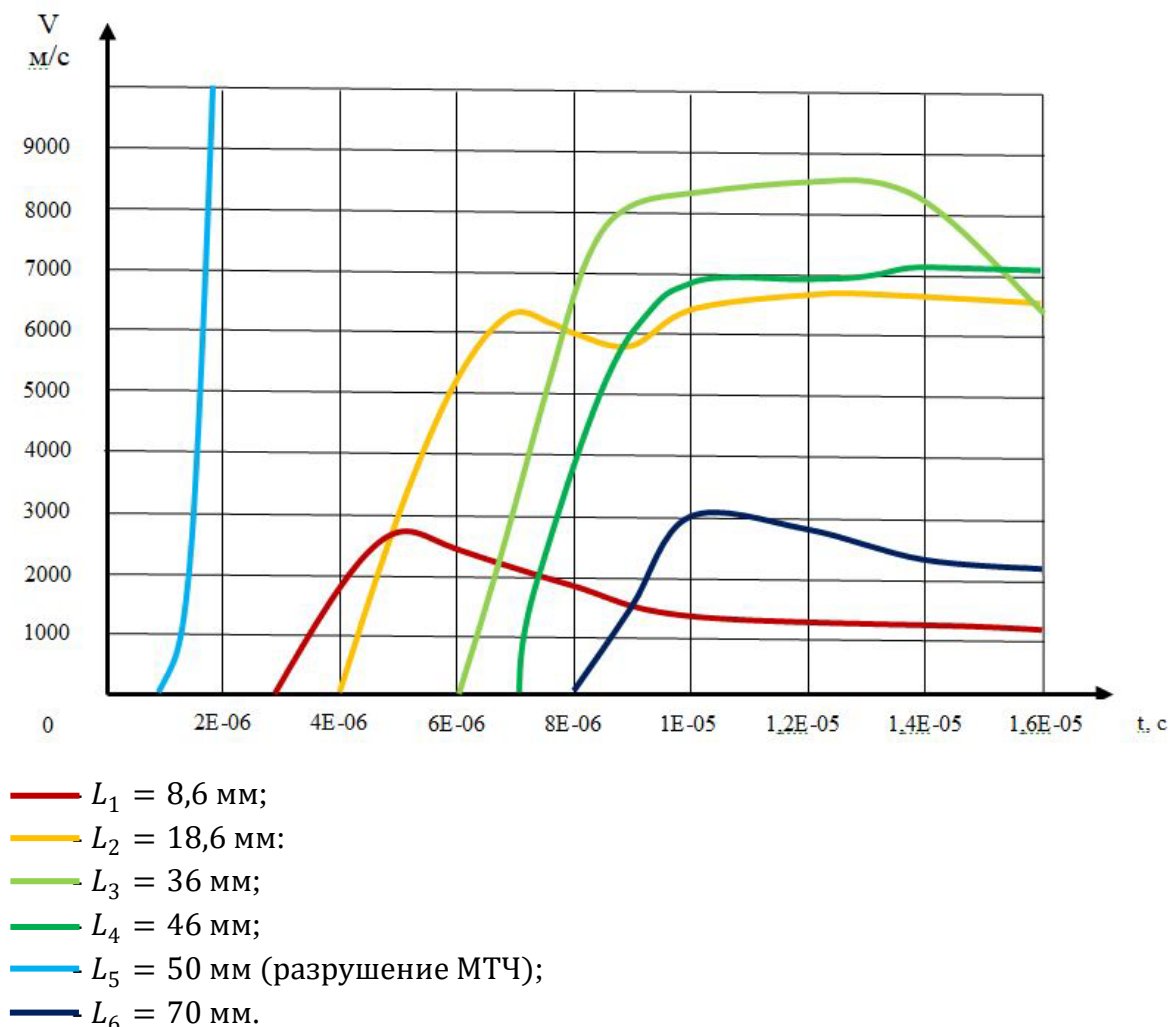


Рис. 4. Зависимость скорости имитатора частицы КМ от времени при различном начальном положении имитатора относительно заряда генератора

**Значения максимальной скорости имитатора частицы КМ
при различном начальном расположении имитатора относительно
заряда генератора, полученные в ходе численного моделирования**

№ опыта	Расстояние от вершины конуса до центра МТЧ (мм)	Скорость МТЧ (м/с)
1	18	6735,1
2	36	8385,6
3	46	7034,7
4	50	-
5	70	3921,3

Результаты моделирования значения скорости имитатора частицы КМ в зависимости от его расположения относительно заряда генератора представлены на рис. 4.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- наибольшую нагрузку имитатор частицы КМ испытывает в начальный момент воздействия на него продуктов взрывчатого превращения (время такого воздействия составляет порядка 0,2 мкс) в независимости от его начального положения;

- при перемещении начального положения имитатора к концевому срезу заряда генератора происходит увеличение достигаемой имитатором скорости;

- при начальном положении имитатора на уровне концевого среза заряда генератора и далее происходит снижение скорости, получаемой имитатором в процессе взрывчатого превращения заряда генератора;

- при начальном положении имитатора на незначительном удалении от среза заряда генератора происходит разрушение имитатора в результате ударного воздействия продуктов взрывчатого превращения, из-за их резкого расширения, имеющего место в данной области генератора;

- максимальная скорость имитатора частицы КМ, полученная в ходе моделирования исследуемого процесса, определялась значением, равным 8385,6 м/с.

Таким образом, проведенные исследования показали, что использование генератора с цилиндрической облицовкой, позволяет обеспечить скорость имитатора частицы КМ (с диаметром 2 мм), превышающую 8000 м/с. При этом для обеспечения максимально возможной скорости имитатор необходимо располагать в непосредственной близости от концевого среза генератора.

Список литературы

1. ОСТ 134-1031-2003. Изделия космической техники. Общие требования по защите космических средств от механического воздействия частиц естественного и техногенного происхождения (введ. 09.01.03). – М.: Российской авиационно-космическое агентство, 2003. – 12 с.

2. Динамика удара / Д.Зукас [и др.]. М.: Мир. 1985. 295 с.
3. Синельников Э.Г. Численное моделирование процесса разгона малоразмерной твердой частицы с помощью газогенератора/ Э.Г.Синельников, М.В.Житный // Известия Тульского государственного университета. Тула: ТулГУ. 2021. Вып. 8. С. 259-264.
4. Синельников Э.Г. Численное моделирование процесса разгона малоразмерной твердой частицы с помощью цилиндрического газогенератора/ Э.Г.Синельников, М.В.Житный // Известия Тульского государственного университета. Тула: ТулГУ. 2022. Вып. 7. С. 65-69.
5. Титов В.М. Разгон твердых тел кумулятивным взрывом / В.М. Титов, Ю.И. Фадеенко, Н.С. Титова // Доклады АН СССР. 1968. Т. 180. №5. С. 1051 - 1052.
6. Леконт К. Высокоскоростное метание // Физика быстропротекающих процессов. Подред. Н.А. Златина. М.: Мир, 1971. Т. 2. 252 с.
7. The equation of state, URL: <http://lib.podelise.ru/docs/1614/index-295.html?page=3> (date of access: 19.08.2014).

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

STUDY OF GAS GENERATOR WITH CYLINDRICAL LINING BY NUMERICAL MODELING

E.G. Sinelnikov, M.V. Zhitnyy

The results of numerical simulation of the process of accelerating a small-sized solid particle using a cumulative generator with a conical recess are shown. The change in the value of the body velocity under different initial conditions is shown.

Key words: small-sized solid particle, high-speed impact, cumulative generator with conical notch.

Zhitnyy Mikhail Vladimirovich, candidate of technical science, docent, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Sinelnikov Eduard Gennadievich, senior researcher, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy

УДК 620.17

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-99-100

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЖОРБИТАЛЬНЫХ МАНЕВРОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СИЛЫ ТЯГИ ДВИГАТЕЛЯ

Л.П. Зозуля, П.С. Гончаров, А.В. Аксенов

В статье представлен расчет параметров манёвров космического аппарата с использованием двигателей малой и большой силы тяги. Определены траектории переходных орбит в зависимости от силы тяги двигателей. Исследованы функциональные зависимости изменения характеристических скоростей при манёвре изменения высоты орбиты. Рассчитаны требуемое время и потребные запасы рабочего тела для двигателей с различными видами тяги с учетом их удельных импульсов.

Ключевые слова: манёвр, сила тяги, удельный импульс, космический аппарат, характеристическая скорость, траектория.

Важное место в процессе полета большинства космических аппаратов (КА) занимают орбитальные манёвры – целенаправленное изменение параметров орбиты КА с помощью двигателя. Проведение маневров позволяет сформировать орбиту, обеспечивающую выполнение КА его целей. Изменение скорости КА, которое необходимо для выполнения орбитального манёвра, называется характеристической скоростью орбитального маневра или просто характеристической скоростью. Орбитальные манёвры делятся на два диаметрально противоположных вида:

1) манёвры с использованием двигателем большой силой тяги (ДБТ);

2) манёвры с использованием двигателем малой силой тяги (ДМТ).

В первом случае двигатель в момент манёвра становится главной действующей силой. Производится кратковременное воздействие, которое почти мгновенно меняет скорость КА. Во втором случае двигатель может работать днями, месяцами и даже годами.

Манёвры с использованием ДБТ для изменения высоты орбиты КА. Изменение высоты орбиты схематично изображено на рисунке 1.

КА движется по круговой орбите радиуса r_1 . Затем, мгновенно увеличивается его скорость на величину характеристической скорости $V_{1\text{ хар}}$. Орбита перестаёт быть круговой, становится эллиптической от точки A до точки B . В точке A у этой орбиты перигей – ближайшая к Земле точка, а через половину витка, в точке B , будет апогей – наиболее удалённая от Земли точка. По мере удаления от Земли скорость будет падать, и в апогее станет относительно наименьшей, в результате КА начнёт приближаться назад к Земле. Для того чтобы не дать КА снова двигаться к Земле, в апогее включается двигатель и сообщается характеристическая скорость $V_{2\text{ хар}}$.

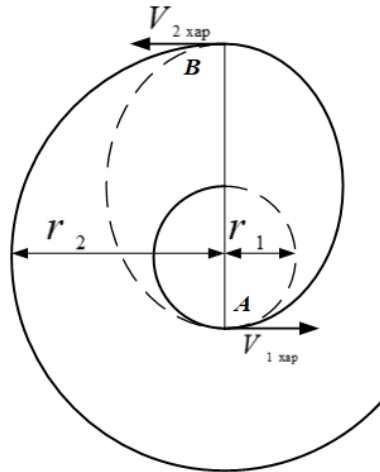


Рис. 1. Изменение высоты орбиты по гомановской траектории

Движение КА ускорится, чтобы он перешёл на круговую орбиту. Скорость орбитального движения вокруг Земли определяется по формуле:

$$V = \sqrt{\frac{\mu}{r}},$$

где μ – гравитационный параметр Земли; r – радиус орбиты; V – круговая скорость.

Для орбиты радиуса r_1 круговая скорость равна V_1 , для орбиты радиуса r_2 – V_2 . Для расчета непосредственно самого манёвра необходимо определить промежуточную величину $V_{\text{промеж}}$:

$$V_{\text{промеж}} = \frac{V_1 - V_2}{2}.$$

Тогда первая характеристическая скорость будет равна:

$$V_{1\text{ хар}} = V_1 \left(\frac{V_1}{V_{\text{промеж}}} - 1 \right).$$

Вторая характеристическая скорость будет равна:

$$V_{2\text{ хар}} = V_2 \cdot \left(1 - \frac{V_2}{V_{\text{промеж}}} \right).$$

Суммарно двигатель должен изменить скорость на $V_{\text{хар}}$:

$$V_{\text{хар}} = V_1 - V_2 = V_{1\text{ хар}} + V_{2\text{ хар}}.$$

Также стоит заметить, что величину характеристических скоростей, создаваемых ДБТ, можно определить и другим путём, через отношение радиусов орбит:

$$\frac{V_{\Sigma\text{ хар}}}{V_1} = \sqrt{\frac{1}{\delta}} - \sqrt{\frac{2}{\delta \cdot (1 + \delta)}} + \sqrt{\frac{2 \cdot \delta}{1 + \delta}} - 1,$$

где

$$\delta = \frac{r_2}{r_1}; \quad \frac{V_{1\text{хар}}}{V_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta}{1 + \delta}} - 1; \quad \frac{V_{2\text{хар}}}{V_1} = \sqrt{\frac{1}{\delta}} - \sqrt{\frac{2}{\delta \cdot (1 + \delta)}}.$$

График относительных величин первой, второй и суммарной характеристических скоростей представлен на рисунке 2.

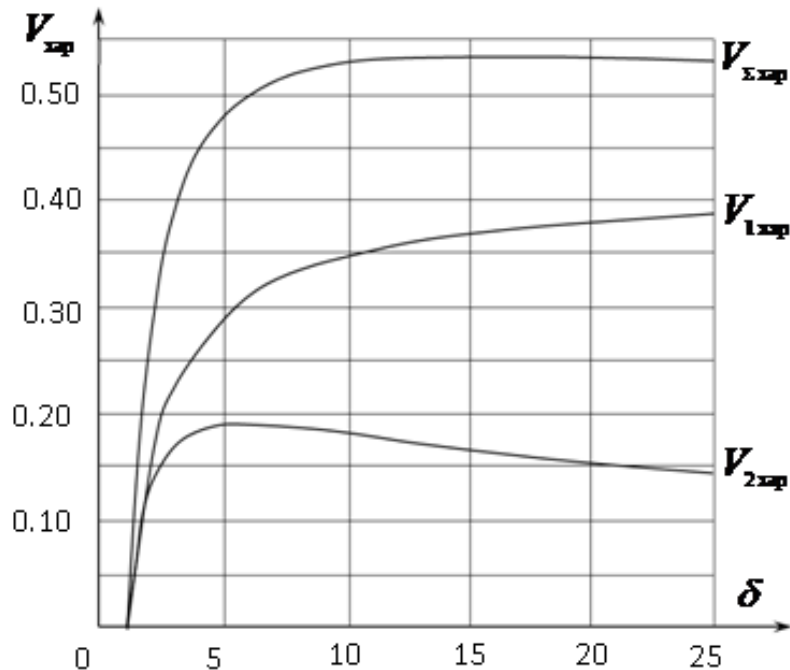


Рис. 2. График относительных величин первой, второй и суммарной характеристических скоростей

При соотношении радиусов орбит $\delta \approx 6$, величина второй характеристической скорости начинает снижаться. А при соотношении радиусов орбит $\delta \approx 15$, рост высоты конечной орбиты приводит к снижению уже суммарной величины $V_{\Sigma \text{хар}}$.

Манёвры с использованием ДБТ для изменения наклонения круговой орбиты. Помимо манёвра изменения высоты существует так же и манёвр по изменению наклонения орбиты (рис.3). Наклонение — это угол между плоскостью орбиты и плоскостью экватора. КА подлетает к точке А пересечения орбитой плоскости экватора со скоростью V_1 . Важно понимать, что скорость является величиной векторной (вектор направлен по касательной к орбите). После манёвра КА должен оказаться на конечной орбите, где у него будет скорость V_2 . По величине она такая же, т.к. высота орбиты не изменялась. Однако направление изменится, теперь это будет касательная в той же точке А, но новой орбиты. Чтобы V_1 превратилась в V_2 необходимо, чтобы двигатель увеличил скорость КА на $V_{\text{хар}i}$. Из треугольника скоростей (рис.3) понятно, что

$$V_{\text{хар}i} = 2 \cdot V_1 \cdot \sin \frac{\Delta i}{2}.$$

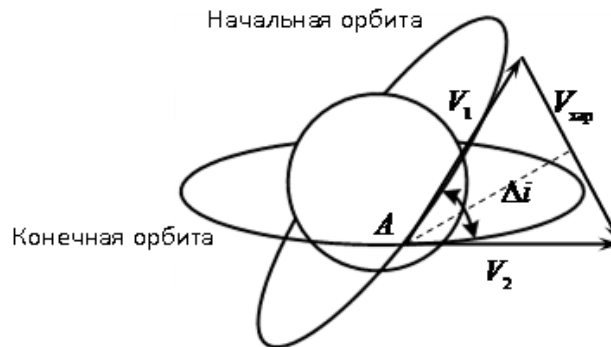


Рис. 3. Манёвр изменения наклонения орбиты

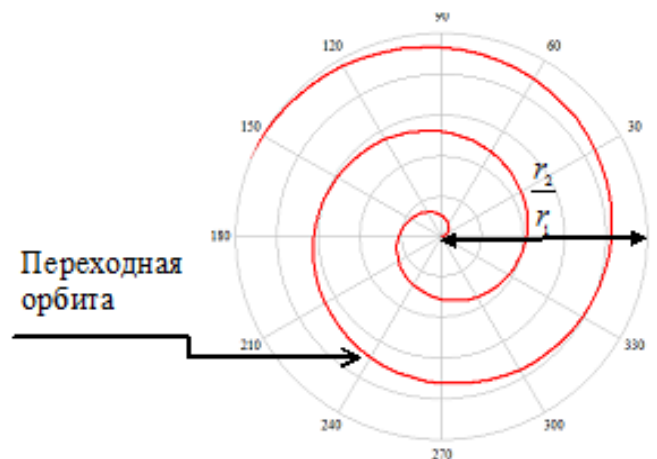


Рис. 4. Спиральная траектория изменения высоты орбиты

Манёврыс использованием ДМТ для изменения высоты круговой орбиты. Ускорение, создаваемое двигателями малой силы тяги (ЭРД), составляет менее $a_\varphi < 1 \text{ м/с}^2$. В таком случае невозможно использовать гомановскую траекторию орбиты, так как на небольшом участке орбиты двигатель не сможет изменить скорость даже на $0,1 \text{ м/с}$, а для большинства манёвров нужно изменение на десятки и сотни метров в секунду. Изменение высоты орбиты осуществляется длительной непрерывной работой двигателя, который всё время создаёт силу тяги строго вдоль направления полёта КА, стараясь его разогнать или затормозить. Из-за этого КА начинает двигаться вокруг Земли не по кругу, а по спирали (рис.4). Уравнение траектории переходной орбиты в относительных единицах [2,3]:

$$r = \frac{1}{\sqrt{(1 + 4 \cdot a_\varphi \cdot \varphi)}},$$

где φ - угол полярной системы координат.

Вид переходной траектории представлен на рисунке 4:

Для проведения оценочных расчетов характеристической скорости для компланарных орбитальных перелетовс ДМТ приемлемым считается расчет по следующей аналитической зависимости:

$$V_{хар} = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}\right),$$

где μ – гравитационный параметр Земли. Выражение для определения времени выполнения межорбитального перелета и времени работы ДМТ имеет вид:

$$t_{пер} = \frac{m_{КА} \cdot I_{уд}}{P_{ДМТ}} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\Delta V_{хар}}{I_{уд}}}\right],$$

где $I_{уд}$ – удельный импульс ДМТ, $P_{ДМТ}$ – сила тяги; $m_{КА}$ – масса КА.

Требуемый запас рабочего тела определяется из соотношения:

$$m_{тр} = \frac{P_{ДМТ}}{I_{уд}} \cdot t_{пер}.$$

Маневры ДМТ для изменения наклонения круговой орбиты.

При рассмотрении изменения наклонения орбиты (рис.6) включение двигателя производится в точках пересечения орбитой экватора, однако поворачивать орбиту необходимо не за один раз, а за несколько, используя множество промежуточных орбит. Двигатель работает примерно от 5% до 10% орбитального периода до подлёта к экватору и ещё 5÷10% – после его пересечения. При двух точках пересечения экватора орбитой, двигатель работает ориентировочно от 20% -40% времени полёта [4,5].

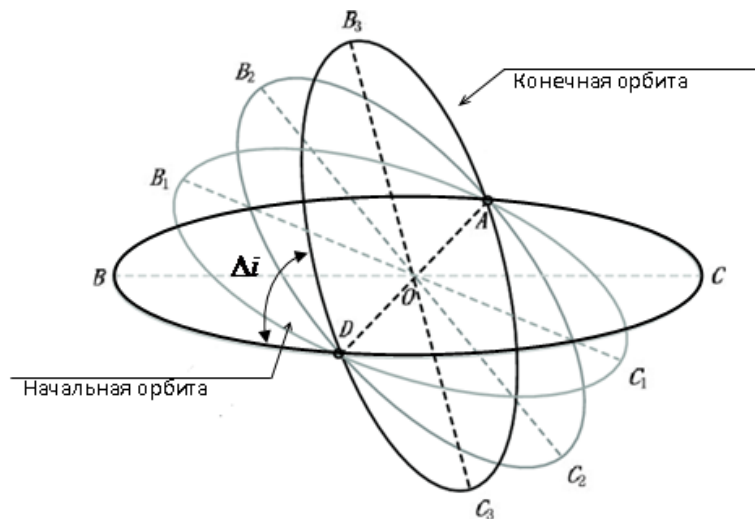


Рис. 5. Упрощённая иллюстрация изменения наклонения на двигателях малой силы тяги

Характеристическая скорость манёвра изменения наклонения в данном случае равна произведению орбитальной скорости на угол поворота орбиты Δi , измеренной в радианах:

$$V_{MTi} = V \cdot \Delta i.$$

Низкой величина будет в том случае, если двигатель работает только точно над экватором. По мере удаления от экватора эффективность работы двигателя будет снижаться, поэтому на практике потребуется на 10% больший V_{MT} , чем даёт эта формула.

Сравнение параметров манёвров в зависимости от силы тяги двигателя. В качестве примера расчета приведены результаты моделирования процесса перелета с орбиты на орбиту с использованием ДМТ и ДБТ. Исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

№ п/ п	Характеристика	Значение	
		ДМТ	ДБТ
1.	Радиус орбиты, r_1 , м	$6,571 \times 10^6$	$6,571 \times 10^6$
2.	Радиус орбиты, r_2 , м	$6,946 \times 10^6$	$6,946 \times 10^6$
3.	Изменение наклонения, Δ орбиты радиуса r_2 , град	$7,66^\circ$	$7,66^\circ$
4.	Начальное наклонение, i , град	90°	90°
5.	Сила тяги P_d , Н	90×10^{-3}	10^3
6.	Удельный импульс $I_{уд}$, м/с	10000	2000

Характеристическая скорость является основным параметром маневрирования. На рисунке 5 представлены графики характеристических скоростей ДБТ и ДМТ.

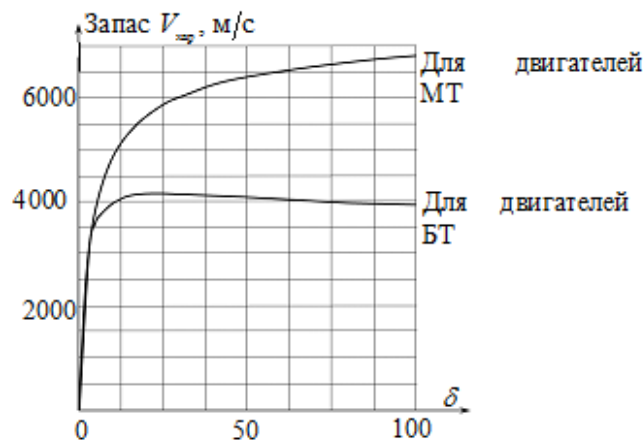


Рис. 6. График величин характеристических скоростей для двигателей большой и малой силы тяги

На графике рисунка 5, можно заметить, что хоть ДМТ всё время разгонял КА, его скорость в итоге стала меньше, на начальной круговой орбите. КА переходит от движения по кругу к движению по раскручиваю-

щейся спирали. У силы притяжения появляется ненулевая проекция на направление движения КА, которая его тормозит. Пока угол раскручивания спирали достаточно мал, чтобы можно было считать, что синус угла примерно равен самому углу, проекция силы притяжения на направление движения аппарата будет ровно вдвое превышать силу тягу двигателя, а потому КА будет ровно настолько сильно замедляться, насколько сильно он ускорялся бы, не будь силы притяжения.

Результаты вычислений времени перелета для ДБТ получены численным интегрированием дифференциальных уравнений движения КА. В таблицах 2 и 3 представлены результаты моделирования

Таблица 2

Манёвр изменения высоты

№ п/п	Параметр манёвра	Значения			
		ДБТ			ДМТ
1.	Требуемая характеристическая скорость, $V_{\text{хар}}$, м/с	$V_{1\text{хар}}$	$V_{2\text{хар}}$	$V_{\Sigma\text{хар}}$	$V_{\Sigma\text{хар}}$
		54	52	106	106
2.	Время перелета, $t_{\text{пер}}$, сек	2959			116525
3.	Требуемый запас рабочего тела, $m_{\text{тр}}$, кг	5,2			1,049

Таблица 3

Манёвр изменения наклона орбиты

№ п/п	Параметр манёвра	Значения	
		ДБТ	ДМТ
1.	Требуемая характеристическая скорость, $V_{\text{хар}}$, м/с	1012	1114

Расчеты показывают, что для совершения манёвра изменения наклона ДМТ требуют незначительно большей $V_{\text{хар}}$, чем ДБТ, в то время как удельный импульс ДМТ в разы выше в сравнении с ДБТ. Масса рабочего тела ДБТ значительно превышает требуемую массу рабочего тела ДМТ. Время выполнения манёвра при помощи ДМТ на несколько порядков больше, чем время совершения маневра с помощью ДБТ.

Список литературы

1. Гродзовский Г.Л. Механика космического полета с малой тягой / Г.Л. Гродзовский, Ю.Н. Иванов, В.В. Токарев. М.: Наука, 1966. 680 с.
2. Титов Г.С., Иванов В.А., Горьков В.Л. Межорбитальные и локальные маневры космических аппаратов. М.: Машиностроение 1982. 245 с.
3. Аверкиев Н.Ф. Основы теории полета летательных аппаратов // Н.Ф. Аверкиев, С.А. Богачев, С.А. Васьков // Учебник. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 242 с.
4. Маневрирование космических аппаратов в окрестности круговой орбиты. М.: Спутник, 2016. 512 с.

5. Боровин Г.К. Идентификация маневров, выполняемых двигателями малой тяги космического аппарата / Г.К. Боровин, М.В. Захваткин, В.А. Степаньянц, А.Г. Тучин, Д.А. Тучин // Инженерный журнал: наука и инновации, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. №2(2). С. 8.

Зозуля Людмила Петровна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Гончаров Павел Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, начальник управления, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Аксенов Алексей Витальевич, инженер отделения, Россия, в/ч 25522

**DETERMINATION OF PARAMETERS OF INTERORBITAL MANEUVERS OF
A SPACECRAFT DEPENDING ON THE THRUST FORCE OF THE ENGINE**

L.P. Zozulya, P.S. Goncharov, A.V. Aksenov

The article presents the calculation of the parameters of spacecraft maneuvers using low- and high-thrust engines. The trajectories of transfer orbits are determined depending on the thrust of the engines. Functional dependencies of the change in characteristic velocities during the maneuver of changing the inclination and the maneuver of changing the orbital altitude are constructed and investigated. The required time and the required reserves of the working fluid for propulsion systems with different types of thrust are calculated taking into account their specific impulses.

Key words: maneuver, thrust force, specific impulse, spacecraft, specific velocity, trajectory.

Zozulya Ludmila Petrovna, candidate of technical science, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Goncharov Pavel Sergeevich, candidate of technical science, docent, head of department, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Aksenov Aleksey Vitalyevich, engineer of a military unit department 25522

УДК 620.17

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-107-108

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ СКОРОСТНОГО МЕТАНИЯ ТВЁРДЫХ ЧАСТИЦ

В.В. Мартынов, Н.А. Шуневич

Выполнен анализ наиболее востребованных способов и средств, применяемых в настоящее время для метания твёрдых частиц при проведении испытаний систем защиты космических аппаратов. Обозначен диапазон реализуемых скоростей частиц для каждого способа. Выявленные преимущества и недостатки рассмотренных способов скоростного метания твердых частиц послужат качественному планированию подобных экспериментов.

Ключевые слова: скоростное метание, легкогазовая установка, взрывчатое вещество, кумулятивный заряд, скорость детонации.

Одним из факторов, негативно влияющих на космический аппарат (КА) в процессе эксплуатации является загрязнённость окружающего его пространства частицами естественного и искусственного происхождения (метеороиды, техногенный мусор). С началом эпохи освоения космоса запустился и стал быстро прогрессировать процесс загрязнения его техногенным мусором. Состояние техногенной засоренности околоземного космического пространства с каждым годом только ухудшается и со временем наносит всё более ощутимый ущерб космической деятельности человека [1]. Воздействие высокоскоростных частиц может привести к выводу из строя отдельных систем КА, либо к катастрофическому его разрушению. Прогнозирование возможных последствий воздействия высокоскоростных частиц, как техногенного, так и естественного происхождения, на КА является важной научно-практической задачей.

Наибольшую опасность космической деятельности представляют частицы небольшого размера ввиду их многочисленности и неконтролируемости [2]. В сложившихся условиях, на первый план обеспечения безопасности полётов выходит испытание систем защиты КА на стойкость к воздействию таких частиц. Проведение подобных испытаний производится в наземных условиях с применением различных способов и устройств, обеспечивающих наиболее вероятные относительные скорости соударения частиц с элементами КА. При этом актуальным является диапазон от сотни м/с до десятков км/с [2].

При проведении испытаний реализация скорости ударника (частицы) в диапазоне приблизительно до 2000 м/с не представляет особых трудностей и обеспечивается обычно с помощью пневматических (до 500 м/с) или пороховых метательных устройств [3,4]. Применяемые при этом устройства достаточно просты по конструкции и в эксплуатации. Экспе-

рименты обычно не требуют больших материальных, энергетических и временных затрат.

Дальнейшее увеличение скорости метания с использованием указанных устройств невозможно. Это связано с тем, что используемые при этом газы (воздух, пороховые газы) имеют высокую молекулярную массу (около 28), т.е. характеризуются относительно малой скоростью звука и, соответственно, малой скоростью расширения (истечения) [1]. Поэтому для достижения более высоких скоростей применяют легкогазовые установки (ЛГУ), где для разгона метаемых ударников используют лёгкий газ, имеющий низкую молекулярную массу, а следовательно, высокую скорость истечения. Схематично конструкция ЛГУ представлена на рис. 1.

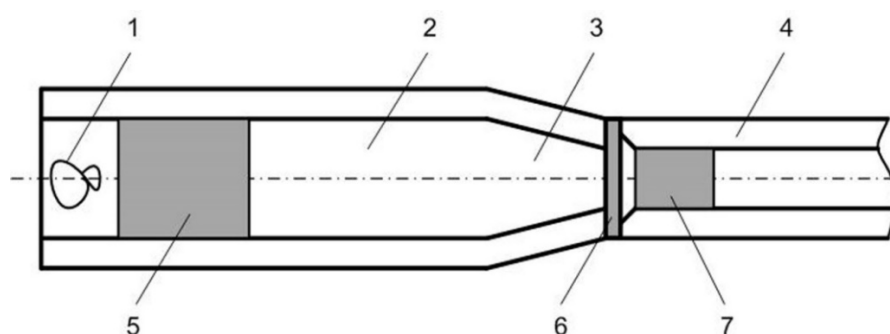


Рис. 1. Схема ЛГУ

Выстрел из ЛГУ осуществляется следующим образом. После инициирования порохового заряда 1 продукты сгорания разгоняют поршень 5, который сжимает лёгкий газ в камере сжатия 2. При переходе поршня 5 в конический переходник 3 происходит его торможение (за счет деформации материала поршня) и дополнительное повышение давления лёгкого газа до величины, необходимой для вскрытия мембраны 6. По достижении заданного давления мембрана 6 вскрывается и лёгкий газ, устремляясь в баллистический ствол 4, разгоняет ударник 7.

Скорость ударника определяется в первую очередь скоростью звука в рабочем газе. Выражение для скорости звука в идеальном газе имеет вид

$$a^2 = \frac{\gamma RT}{\mu}, \quad (1)$$

где γ – показатель адиабаты; R – универсальная газовая постоянная; T – температура газа; μ – молекулярная масса газа.

Из выражения (1) следует, что скорость звука в идеальном газе определяется молекулярной массой газа и его температурой. Чтобы увеличить скорость звука в газе, а следовательно, скорость метания ударника, надо стремиться к уменьшению молекулярной массы и повышению температуры рабочего газа. В качестве рабочего газа в ЛГУ выгодно использовать водород ($\mu = 2$) или гелий ($\mu = 4$). Возможно также применение других лёгких газов и газовых смесей, например КВГС (кислородно-водородно-

гелиевой смеси с $\mu = 6$). Особенно эффективным является применение водорода, однако наибольшее распространение получил гелий. По сравнению с водородом он абсолютно безопасен и не горюч. С помощью ЛГУ, использующей в качестве рабочего газа гелий, реально разогнать ударник до скоростей около 5 км/с. Среди недостатков способа следует отметить нестабильность получения заданной скорости ударника, высокие затраты на эксперимент. Положительными моментами являются достаточно широкий диапазон реализуемых скоростей ударника, его сохранность при разгоне и точность попадания в цель.

Другим способом разгона частиц является метание их продуктами детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Такой способ достаточно прост и эффективен. На рис. 2 показан типичный ускоритель, использующий для разгона частиц энергию взрыва заряда ВВ. При этом частицы разгоняются расширяющимися продуктами детонации ВВ, максимальную скорость распространения $u_{\max}$ которых можно оценить выражением

$$u_{\max} = \frac{2\gamma D}{(\gamma^2 - 1)}, \quad (2)$$

где γ – показатель адиабаты (для типичных конденсированных ВВ $\gamma = 3$); D – скорость детонации ВВ.

Для оценки возможностей такого способа необходимо в выражение (2) подставить значения скорости детонации типичных ВВ. Результаты вычислений представлены в таблице.

Максимальная скорость распространения продуктов детонации ВВ

Тип ВВ	Скорость детонации, м/с	Максимальная скорость распространения продуктов детонации, м/с
Тротил	6700	5025
Гексоген	8640	6480
Октоген	9100	6825

Следует подчеркнуть, что выражение (2) определяет максимальную скорость продуктов детонации ВВ. Реальная скорость разгоняемых частиц, по понятным причинам, будет ниже.

Основным недостатком способа является вероятность разрушения ударника при реализации высоких скоростей. Под воздействием больших ударных нагрузок и высокой температуры продуктов детонации возможно дробление ударника на более мелкие осколки. При этом преимущественное значение имеет воздействие ударных нагрузок. Для снижения негативного влияния указанных факторов предусмотрен воздушный зазор 4. Однако следует учитывать, что увеличение его размера ведёт к снижению скорости ударника.

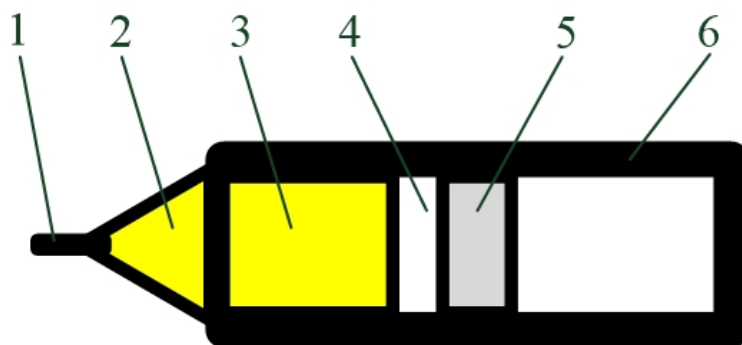


Рис. 2. Ускоритель частиц: 1 – электродетонатор, 2 – генератор плоской детонационной волны (ВВ), 3 – основной заряд ВВ, 4 – воздушный зазор, 5 – метаемый элемент (ударник, частица), 6 – корпус

Интенсивность и характер ударных нагрузок, создаваемых зарядом, можно оценить по характеристикам ВВ – давлению детонации, бризантности и фугасности. Давление детонации – давление во фронте детонационной волны в заряде ВВ. При прохождении детонационной волны давление нарастает скачкообразно, для большинства ВВ давление детонации составляет 5-26 ГПа. Давление детонации является важным показателем эффективности применения ВВ. От его величины и продолжительности действия зависят форма и величина полезной работы взрыва. Чем выше давление детонации, тем больше дробящее (бризантное) действие взрыва. Чем больше время действия, тем выше метательное (фугасное) действие взрыва. При планировании подобных экспериментов выбор типа применяемого ВВ имеет важное значение. В целом, рассматриваемый способ вполне приемлем и является достаточно распространённым при проведении исследований по воздействию высокоскоростных частиц на КА.

Для получения более высоких скоростей метания используют явление кумуляции ударных волн. Способ основан на применении кумулятивных зарядов, так называемых кумулятивных генераторов. В заряде выполнена выемка определённой формы на границе которой распространяющаяся по ВВ ударная волна преломляется и фокусируется в кумулятивную струю. Скорость струи значительно выше скорости детонации и может достигать значений более 14 км/с. Кумулятивная выемка может иметь форму конуса, полусферы, параболоида вращения, цилиндра. В работе [5] описаны

эксперименты по метанию алюминиевых шариков диаметром 6-8 мм с использованием кумулятивных генераторов из октогена. Средние скорости фрагментов ударников составили от 4,7 до 9,6 км/с. Проблема обеспечения целостности ударника присуща и этому способу метания. Для защиты ударников от разрушения применялись различные варианты демпферов, призванных снизить ударные нагрузки в первоначальный момент времени. С этой целью использовались специальные оболочки из сублимиру-

ющих материалов, в том числе многослойные, различные схемы поддонов из мягких материалов, гидравлические подушки. Однако существенного результата в данном направлении достичь не удалось.

В качестве возможного варианта сохранения целостности ударников предложена идея изготавливать их из более прочных и тугоплавких материалов. Другая идея заключается в использовании многокаскадного метания, когда ударник последовательно (ступенчато) набирает заданную скорость. В качестве примера такой схемы может служить двухступенчатое метание, первой ступенью которого является ЛГУ, а второй – взрывной кумулятивный генератор, установленный на срезе ствола. Подобные схемы многоступенчатого метания, в том числе с использованием нескольких последовательно срабатывающих кумулятивных зарядов, неоднократно предлагались различными авторами. Однако их практическая реализация сталкивается с многочисленными трудностями, прежде всего, с обеспечением своевременной отработки зарядов (синхронизации их инициирования). К примеру, предварительно разогнанный до скорости 2 км/с ударник пролетает активную зону действия кумулятивного заряда за время, приблизительно 20 мкс. Обеспечить своевременное инициирование заряда с такой точностью – непростая задача. Для сравнительной оценки, время срабатывания распространённого электродетонатора мгновенного действия ЭД-8 составляет 2-6 мс [6]. За такое время ударник покрывает расстояние 4-12 м (при скорости 2 км/с). Поэтому своевременное инициирование кумулятивного заряда при использовании способа многокаскадного метания ударника – важная задача, требующая дополнительных исследований.

На основе проведённого анализа определены наиболее востребованные способы и средства, применяемые в настоящее время для метания твёрдых частиц при проведении испытаний защитных элементов КА. Обозначены возможные границы скоростных диапазонов разгона частиц для каждого из способов метания, отмечены преимущества и определены недостатки рассмотренных способов. Представленная информация призвана послужить качественному планированию подобных экспериментов.

Список литературы

1. Чёрный И. Куарону и не снилось.... Разгрести «орбитальную свалку» // Новости космонавтики / Роскосмос. 2017. № 6. С. 50 – 52.
2. ОСТ 134-1031-2003. Изделия космической техники. Общие требования по защите космических средств от механического воздействия частиц естественного и техногенного происхождения (введ. 09.01.03). – М.: Российской авиационно-космическое агентство, 2003.
3. Синельников Э.Г. Экспериментальная газодинамическая импульсная пневматическая метательная установка / Э.Г. Синельников, М.В. Житный, В.В. Мартынов, Д.Ю. Детёнышев // Труды XXIII Всероссийской

научно-практической конференции. Том 1. СПб.: НПО СМ. 2020. С. 92 – 95.

4. Мартынов В.В. Совершенствование конструкции пневматической метательной установки / В.В. Мартынов, В.М. Скутницкий, Т.Ю. Девяткина // Труды XXVI Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: НПО СМ. 2023. С. 84 – 89.

5. Экспериментальные исследования воздействия высокоскоростных тел на элементы конструкции противомикрметеоритной защиты орбитальных станций и космических аппаратов: Отчет по НИР №10195 /научный руководитель С. Ветелев. СПб.: ВКАим.А.Ф.Можайского, 1995. 74 с.

6. ГОСТ 9089-75. Электродетонаторы мгновенного действия. Технические условия. Введ. 01.01.78. М.: Изд-во стандартов. 1978. 40 с.

Мартынов Виктор Васильевич, старший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского,

Шуневич Николай Александрович, канд. техн. наук, начальник лаборатории, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского

ANALYSIS OF THE MAIN METHODS AND MEANS OF HIGH-SPEED THROWING OF SOLID PARTICLES

V.V. Martynov, N.A. Shunevich

The analysis of the most popular methods and means currently used for throwing solid particles during tests of protection systems-spacecraft- has been performed. The range of realized particle velocities is indicated for each method. The identified advantages and disadvantages of the considered methods of high-speed throwing of solid particles will serve as a qualitative planning of such experiments.

Key words: high-speed throwing, light-gas installation, explosive substance, shaped charge, detonation rate.

Martynov Victor Vasilievich, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Shunevich Nikolay Alexandrovich, candidate of technical science, head of the laboratory, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy

ОБЗОР ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАСТВОРИМОСТЬ ГАЛЛИЯ

Г.Р. Пецух, М.А. Девяткина, А.М. Бабин

Галлий и алюминий являются самыми распространёнными элементами земной коры. Соединения на их основе отличаются уникальными характеристиками, которые в настоящее время находят множество практических применений. Благодаря высокой степени чистоты, галлий является основным сырьём для полупроводниковой промышленности. В сфере микроэлектроники ключевое значение имеет диапазон рабочих характеристик металла. В данном обзоре было рассмотрено изменение растворимости галлия под действием термодинамических факторов.

Ключевые слова: галлий, эвтектика, растворимость, термодинамическое равновесие, коррозия.

Диаграмма состояния системы алюминий-галлий (Al-Ga) является эвтектической с малой растворимостью компонентов друг в друге [1]. Со стороны алюминия имеется область твёрдого раствора, граница которого при комнатной температуре доходит до концентрации галлия 21% (по массе). Эвтектика со стороны галлия соответствует 96 % (масс.), а температуре – 26,5°C [2, 4]. Алюминий беспрепятственно растворяется в галлии и легко удаляется из сплава под действием кислот, оснований и других окислителей. Данную особенность используют для реакций контактного восстановления алюминием более электроположительных ионов в растворе.

Растворимость галлия в металлах была исследована на основании уравнения [1] термодинамического равновесия [3]:

$$\Delta G_B = RT \ln a_{ж,B} = (\Delta S_{пл.} + \Delta S_B)T - (\Delta H_{пл.} + \Delta H_B), \quad (1)$$

где ΔG_B – свободная энергия Гиббса, Дж/моль.; R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль*К); T – температура, К; $a_{ж,B}$ – активность растворённого компонента В; $\Delta S_{пл.}$ – энтропия плавления, Дж/(моль*К); ΔS_B – энтропия компонента В, Дж/(моль*К); $\Delta H_{пл.}$ – энтальпия плавления, Дж/моль; ΔH_B – энтальпия компонента В, Дж/моль.

Свободная энергия Гиббса является мерой реакционной способности того или иного вещества. Поскольку активность химического элемента связана с его концентрацией через поправочный коэффициент, то при известных в литературе допущениях получим уравнение [2]:

$$\lg N = \left\{ 2 + \frac{\Delta S_{пл.} + \Delta S_B}{2,3R} \right\} - \left\{ \frac{\Delta H_{пл.} + \Delta H_B}{2,3RT} \right\} = A - B/T, \quad (2)$$

где N – концентрация компонента, моль/л; A и B – термодинамические постоянные.

Для алюминия $\Delta H_{пл.}$ составила 10,55 кДж/моль, а растворимость в жидком галлии равнялась 49 (ат. %) при 673 К и 68 (ат. %) при 773 К, соответственно.

При взаимодействии металлов с жидким галлием их устойчивость к коррозии пропорциональна энергии связи атомов в кристаллической решётке [3]. На первом этапе данного процесса происходит разрыв связей металл-металл (Me-Me) и их замена на связи металл-галлий (Me-Ga). Во втором этапе происходит диффузия продуктов реакции с поверхности металла в его глубину. В этом случае скорость коррозии определяется по закону Фика [3]:

$$J = \frac{D(C_H - C)}{\sigma}, \quad (3)$$

где J – диффузионный поток вещества, моль/(м²*с); D – коэффициент диффузии, м²/с; $(C_H - C)$ – разность концентраций растворённого вещества на границе раздела фаз и в объёме, моль; σ – толщина диффузионного слоя, м.

Зависимость концентрации металла от времени диффузии при указанных параметрах описывается уравнением [4]:

$$\frac{C}{C_H} = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha S \tau}{V}\right), \quad (4)$$

где α – константа скорости растворения, моль*м/с; S – поверхностная зона растворения, м²; τ – время диффузии, с; V – объём жидкого металла, м³.

В обширной области температур экспериментальные значения коррозии подчинялись прямолинейной зависимости [5]:

$$\lg \tau = a + b/T, \quad (5)$$

где τ – время полной коррозии, с; a и b – константы (постоянные); T – температура, К.

В интервале температур 373÷523 К для оценки диффузии алюминия в галлии уравнение [5] приняло вид [6]:

$$\lg \tau = 2,37 + 1,74/T. \quad (6)$$

На основании проведённых расчётов, в табл. 1 были определены значения коррозии алюминия при различных температурах.

Таблица 1

Коррозия алюминия в галлии под действием температуры

№ п/п	Температура, К	Скорость коррозии, кг/(м ² *с)
1	373	$3,9 \times 10^{-2}$
2	473	$8,4 \times 10^3$
3	573	$1,9 \times 10^4$
4	673	$2,9 \times 10^4$
5	773	$3,8 \times 10^4$

Таким образом, для рассмотренной системы металлов тенденция к расслаиванию приводит только к субмикроскопическому строению жидкого сплава, при котором атомы каждого компонента преимущественно

оказаны одноимёнными атомами. Однако из-за низких значений энтальпии макроскопического расслоения расплава ещё не происходит. Согласно результатам расчётов, была обнаружена малая растворимость компонентов друг в друге при нормальных условиях. Коррозия алюминия в жидком галлии проявляется при температурах выше 200 °С. Полученный ряд значений растворимости характеризует изменение прочности связи атомов в чистом металле по сравнению с связями между растворимым веществом и галлием. Когда энергия связи между атомами металла (Me-Me) намного больше энергии связи между атомами металла и галлия (Me-Ga), атомы галлия не могут разрушить кристаллическую решётку, и металл не будет растворяться в галлии. Однако при равенстве или небольшом различии в этих энергиях связи вероятность диффузии поверхностных атомов растворимого вещества, а также его растворимость будут подчиняться статистическим закономерностям.

Список литературы

1. Иванова Р.В. Химия и технология галлия. М.: Металлургия, 1973. 392 с.
2. Редкие и рассеянные элементы. Химия и технология: учебное пособие для вузов / С.С. Коровин, В.И. Букин, П.И. Федоров, А.М. Резник. Москва: МИСИС, 2003. 404 с.
3. Галлий: Технологии получения и применение жидких сплавов: Монография / С.П. Яценко, Л.А. Пасечник, В.М. Скачков, Г.М. Рубинштейн. Москва: РАН, 2020. 344 с.
4. Gray F. et al. Gallium and gallium compounds // Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. JohnWiley&Sons, Inc. 2000. P. 1–26.

Пецух Георгий Русланович, младший научный сотрудник, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Девяткина Мария Александровна, лаборант, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Бабин Александр Михайлович, научный сотрудник, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

AN OVERVIEW OF THE INFLUENCE OF THERMODYNAMIC FACTORS ON THE SOLUBILITY OF GALLIUM

G.R. Petsukh, M.A. Devyatkina, A.M. Babin

Gallium and aluminum are the most common elements of the Earth's crust. Compounds based on them have unique characteristics that currently find many practical applications. Due to its high degree of purity, gallium is the main raw material for the semiconductor

industry. In the field of microelectronics, the range of metal performance characteristics is of key importance. In this review, the change in the solubility of gallium under the influence of thermodynamic factors was considered.

Key words: gallium, eutectic, solubility, thermodynamic equilibrium, corrosion.

Petsukh Georgii Ruslanovich, junior, researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Devyatkina Maria Alexandrovna, laboratory worker, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Babin Alexander Mikhailovich, researcher, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy

УДК 62-529

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-116-117

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОИМИТАТОРОВ В ЗАДАЧЕ ОТЫСКАНИЯ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ

Д.С. Феофилов

Задача отыскания квазиоптимального управления сложным динамическим объектом, содержащим нелинейность, в условиях неполной информации является трудновыполнимой. Одной из проблем при ее решении является невозможность использования аналитических подходов, например таких как принцип максимума Понтрягина. Это обусловлено тем, что описание таких систем с помощью дифференциальных уравнений имеет разрывные правые части. Еще одной особенностью является недостаток информации об объекте управления. О нем известно лишь то, что он содержит нелинейность из известного класса, а также его реакция на различные управляющие воздействия. Такой объект называется «серым ящиком». В настоящей работе рассматривается задача отыскания квазиоптимального программного управления сложным динамическим объектом, содержащим нелинейность, в условиях неполной информации. Для ее решения авторы предлагают применить модифицированный численный метод, основанном на принципе максимума Понтрягина и алгоритме последовательных приближений, разработчиками которого являются Ф.Л. Черноусько и И.А. Крылов, с использованием нейроимитатора объекта управления, точно повторяющим его динамику. Приведен пример работы представленного метода.

Ключевые слова: квазиоптимальное управление, искусственная нейронная сеть, метод Черноусько-Крылова, принцип максимума Понтрягина.

В настоящее время проблема синтеза управления для сложных нелинейных динамических объектов является одной из востребованных задач теории автоматического управления. Она подразделяется на два типа. Первый заключается в создании корректирующего устройства, осуществляющего управление замкнутым контуром. Второй подразумевает собой отыскание такого воздействия, которое будет удовлетворять заданному ал-

горитму при корректировании разомкнутого контура. Такое управление называется программным. Рассматривая подробнее вторую задачу, можно сделать вывод о том, что такое управление должно быть оптимальным или близким к нему, чтобы использовать все возможности объекта. Эту проблему решил Л.С. Понтрягин, доказав свою теорему о принципе максимума. Однако, такой подход позволяет находить оптимальное управление аналитическим методом. При работе с системами высокого порядка это вызывает трудности в связи с трудоемкостью вычислений. Возможным решением данной проблемы может быть интеграция численных итерационных методов в алгоритм, предложенный Л.С. Понтрягиным. Использовать метод последовательных приближений предложили Ф.Л. Черноусько и И.А. Крылов. Данный подход предполагает наличие полной верифицированной математической модели объекта управления, которую не всегда возможно получить. Необходимо комплексное решение, которое будет включать в себя использование численных методов и возможность работы с объектом типа «серый ящик»

Проанализировав существующие современные подходы к решению данной задачи, можно выделить несколько основных направлений развития. Первый метод предполагает идентифицировать объект управления с помощью алгоритмов машинного обучения, выявить оптимальную структуру нейронной сети и определить ее параметры [1-3]. Предлагается использование ИНС с радиальной базисной функцией, а для ее обучения генетические алгоритмы. Еще одним подходом к решению данной задачи является создание универсального решения для класса объектов. Так называемая AI PONTYAGIN [4-5] позволяет находить квазиоптимальное управление объектом, имея информацию только о поступающем на него воздействии и выходном сигнале. Данная нейронная сеть обучается на дифференциальных уравнениях системы, характеризующих ее динамику [6]. Однако, вышеописанные подходы имеют недостатки. Обучение представленных нейронных сетей требовательно к вычислительным ресурсам и времени, первый подход лишь реализует идентификацию объекта, а второй предполагает наличие точного верифицированного математического [7] описания системы для вычисления квазиоптимального управления.

В настоящей работе авторами предлагается использование искусственных нейронных сетей для синтеза нейроимитатора, точно повторяющего динамику объекта. Ставится задача синтеза квазиоптимального управления в условиях неполной информации и ограничений, наложенных на время и входное воздействие. Известно, что объект содержит нелинейность типа насыщение, однако его математическое описание достоверно неизвестно. Критерием оптимальности является максимизация выходной величины. Для решения поставленной задачи предлагается использование численного метода отыскания квазиоптимального управления Черноусько-Крылова, модифицированного авторами.

Постановка задачи. В общем случае задача отыскания оптимального управления ставится следующим образом [8].

Объект задается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x, u) \quad (1)$$

где x – n -мерная вектор-функция координат от времени t , u – m -мерная вектор-функция управления от времени t , f – n -мерная функция правых частей. Функция правых частей может быть как линейная, так и нелинейная или кусочно-непрерывная. Следует отметить, что наличие уравнений (1) не обязательно для нахождения управления рассматриваемым методом.

Фазовые переменные должны удовлетворять начальным условиям

$$x(t_0) = x_0 \quad (2)$$

где t_0 – начальный момент времени.

Управляющие воздействия принадлежат известному заданному множеству U

$$u \in U \quad (3)$$

Минимизируемый функционал задан в общем виде

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^n c_i x_i(T), \\ \sum_{i=1}^n c_i^2 &\neq 0, \\ T &> t_0. \end{aligned} \quad (4)$$

где T – конечный момент времени, c_i – коэффициенты при фазовых переменных (импульсы).

В большинстве случаев, задача выполняется в условиях ограниченного времени, так как при интеграции систем автоматического управления наиболее сложным является переходный период.

В целях поиска оптимального управления можно воспользоваться алгоритмом Черноузько-Крылова. Он выглядит следующим образом. Затем, после выбора ограничений на время, задается точность вычислений, дискретный вектор времени и управление (5), а также перевернутый вектор времени (7). Он необходим для того, чтобы осуществить обратную интеграцию функции Гамильтона.

$$t = (0, t_{end}), \Delta t \quad (5)$$

$$U t = U_1, U_2, \dots, U_n \quad (6)$$

$$t_r = (t_{end}, 0), \Delta t \quad (7)$$

Следом следует решение системы дифференциальных уравнений (1), которые необходимы для нахождения значения оптимальной координаты (перемещения) в конце периода времени. Требуется вычислить вектор приращений фазовых координат, который необходим для расчета градиента.

$$dx = \Delta x \cdot (\max(xt_{end}) - \min(xt_{end})) \quad (8)$$

Вычисляется функция Гамильтона:

$$\Psi(t, \psi) = -\nabla(F, t, x, u, dx) \cdot \psi \quad (9)$$

Далее с помощью алгоритма последовательных приближений рассчитывается изменение выходной величины и управления. Начинается цикл с изменением шага

$$U = \alpha \cdot U_{new} + (1 - \alpha) \cdot U_0 \quad (11)$$

Решается система дифференциальных уравнений (1) в прямом времени и определяется значение оптимизируемой координаты. Если новое значение больше, чем рассчитанное на предыдущей итерации, то цикл останавливается, рассчитывается изменение управляющего воздействия (12) и выходной координаты (13)

$$dU = \sum_{i+1}^N \frac{U(i) - U_0(i)}{N} \quad (12)$$

$$dy_{max} = \frac{y_{max} - y_{0max}}{y_{max}} \quad (13)$$

Предложенный метод относится к численным и итерационным подходам, что требует соблюдения условий сходимости. Авторы подчеркивают, что алгоритм подходит только для систем низкого порядка, что значительно сужает его применимость. Таким образом, с помощью метода Черноусько-Крылова возможно получить управление, близкое к оптимальному, лишь в ограниченных случаях, когда динамика объекта описывается дифференциальными уравнениями низкого порядка.

Построение нейроимитатора. Рассмотрим задачу отыскания квазиоптимального управления в условиях неполной информации об объекте. Первым этапом является выбор архитектуры нейроимитатора. Он реализуется на цифровых устройствах, что позволяет считать его дискретным. В таком случае, записав разностные уравнения линейной системы, можно сделать вывод о том, что архитектура линейного нейроимитатора будет состоять из одного нейрона без функции активации, на вход которого подается вектор состояния системы и вектор управления. На рис.1. показана обобщенная структура нейроимитатора, точно повторяющего динамику линейной системы [9]

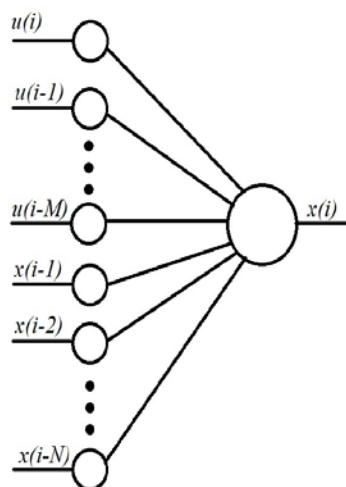


Рис.1. Обобщенная структура нейроимитатора, точно повторяющего динамику линейной системы

Проанализируем случай построения нейроимитатора нелинейной системы. В данной работе рассматривается класс нелинейностей типа насыщение, наложенных на одну из переменных состояния. Основной проблемой построения такого нейроимитатора является выбор функции активации. Предлагается использование в качестве ее ReLU [10]. Это связано с простотой математического описания выделенного класса нелинейностей (14).

$$y(x) = -\text{relu}(x - D) + \text{relu}(x) - \text{relu}(-x) + \text{relu}(-x - D) \quad (14)$$

где положительная линейная часть $\text{relu}(x)$, отрицательная линейная часть $-\text{relu}(-x)$, положительное (верхнее) ограничение $-\text{relu}(x - D) + \text{relu}(x)$, отрицательное (нижнее) ограничение $-\text{relu}(-x) + \text{relu}(-x - D)$.

В соответствии с методикой, выражение для минимального размера скрытого слоя нейроимитатора имеет вид (13).

$$n_{\text{hidden}} = 4n_{\text{sat}} + 2n_{\text{lin}}, \quad (15)$$

где n – порядок системы, $n = n_{\text{sat}} + n_{\text{lin}}$, n_{sat} – ограниченные фазовые переменные, n_{lin} – неограниченные фазовые переменные.

Следующим этапом является обучение нейронной сети. Оно осуществляется по методу обратного распространения ошибки [11]. Его суть заключается в том, что сигнал рассогласования между ожидаемым выходным сигналом и сигналом выхода нейронной сети передается к каждому нейрону в обратном направлении. Вычисляется градиент оптимизируемого функционала и на его основе корректируются коэффициенты весовых связей. Для использования такого метода необходима обучающая выборка. Она формируется на основании реакции объекта управления на типовые входные воздействия, такие как ступенчатая, гармоническая функция и меандр. Далее формируется таблица данных, включающая в себя вектор состояния объекта и вектор управления на каждом такте квантования. Полученная выборка делится в соотношении 70/30 на обучающую и тестирующую соответственно [12].

Таким образом, настройка нейроимитатора завершена. Он точно повторяет динамику объекта и может быть использован в алгоритме отыскания оптимального управления.

Модификация алгоритма Черноусько-Крылова. Рассмотрим логику работы алгоритма расчета квазиоптимального управления. В качестве примера приводится объект третьего порядка, на фазовую переменную скорости которого наложено ограничение типа насыщение.

$$x_1 = \begin{cases} \frac{(ku-x_1)}{T}, & \text{if } x_1 < D \text{ or } x_1 = D \text{ and } \frac{(ku-x_1)}{T} \text{sign}(x_1) \leq 0 \\ 0, & \text{if } x_1 = D \text{ and } \frac{(ku-x_1)}{T} > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$x_3 = \frac{kx_1 - x_2}{T^2} - \frac{2\xi x_3}{T} \quad (17)$$

где x_1, x_2, x_3 – переменные состояния, $\pm D$ – уровень ограничителя, u – управление, k, T, ξ – параметры системы.

Отметим, что объект представляет собой системы типа «серый ящик» и о нем известно лишь то, что он имеет линейную и нелинейную часть. В таком случае, предлагается провести синтез двух нейроимитаторов, один из которых точно повторяет динамику дискретного апериодического звена с ограничителем типа насыщение, а второй динамику линейного колебательного звена. Предложенная схема системы, состоящей из двух нейронных сетей, имеет вид, показанный на рис.2.

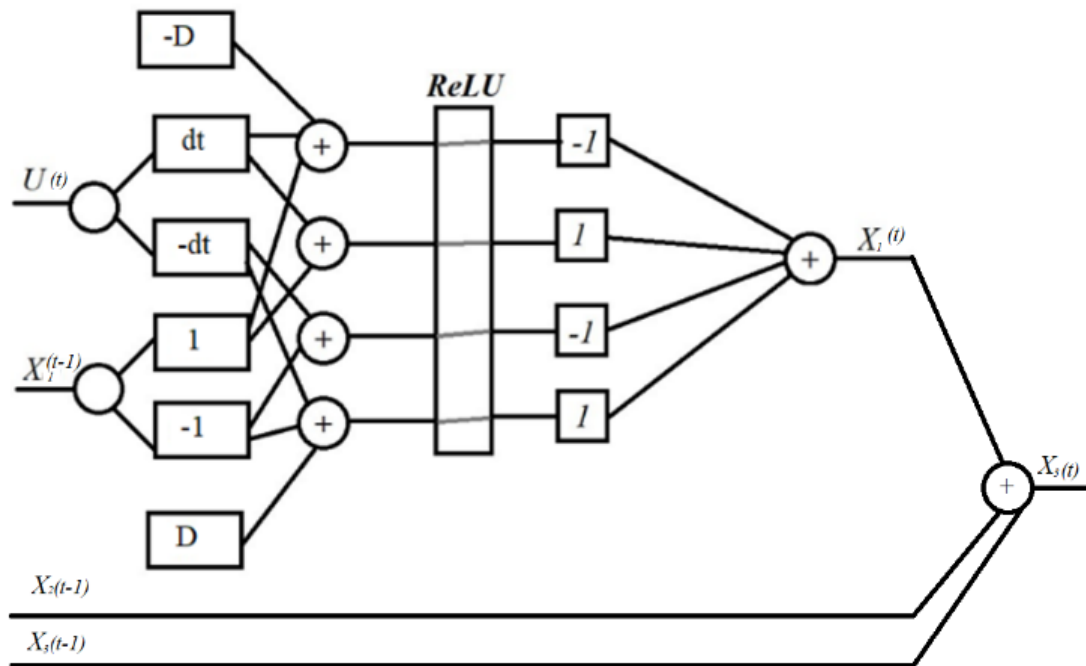


Рис. 2. Система нейронных сетей, точно повторяющих динамику дискретного объекта с наложенным на переменную x_1 ограничением типа насыщение

Данная система используется в численном алгоритме расчета квазиоптимального управления вместо дифференциального описания системы. На ее вход подается вектор, состоящий из управления и фазовых переменных на предыдущем шаге. Выходом является вектор переменных состояния. Положительными сторонами данного метода являются возможность вычисления градиента функционала при наличии разрывных правых частей в математическом описании системы и способность работы алгоритма с системами типа «серый ящик».

Пример работы алгоритма. Математическая постановка задачи нахождения квазиоптимального управления имеет вид (18).

$$x_2(t) \rightarrow \infty, t = [(0,2), 0.001], u \in U, D = \pm 1 \quad (18)$$

где U некоторое известное множество, в которое может входить оптимальное управление, D – ограничение на фазовую переменную.

Промоделируем алгоритм в двух случаях, при достижении ограничения по фазовой переменной и без него (рис.3-5).

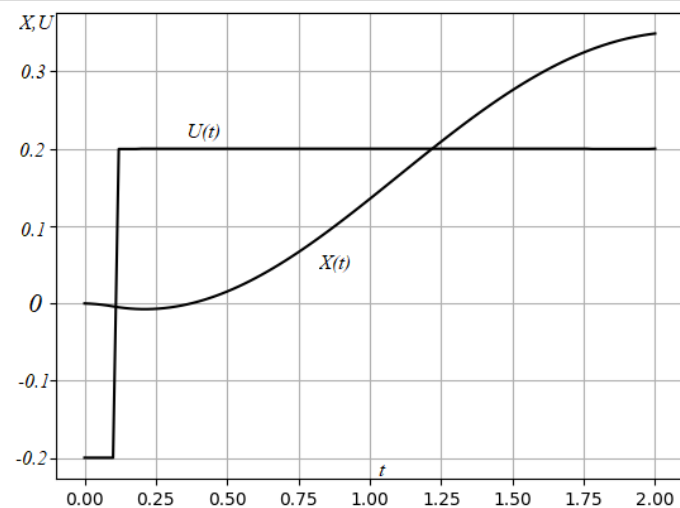


Рис. 3. Пример работы алгоритма без достижения ограничений ($u=0.2$)

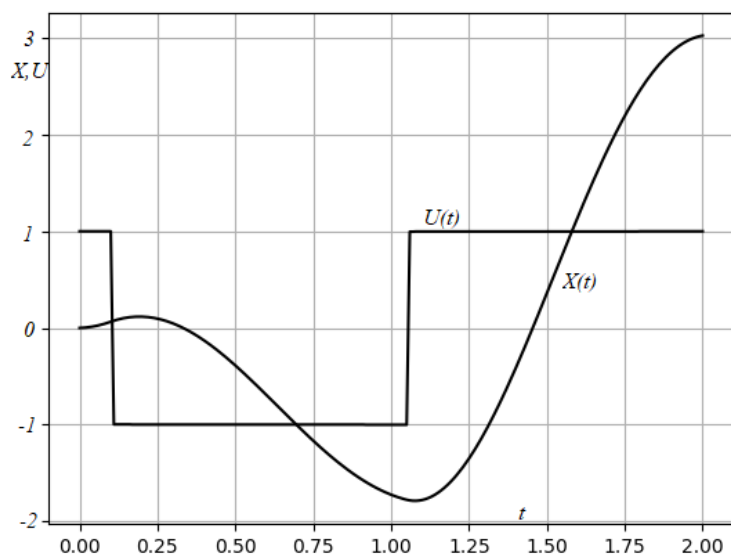


Рис. 4. Пример работы алгоритма с достижением ограничения ($u=1$)

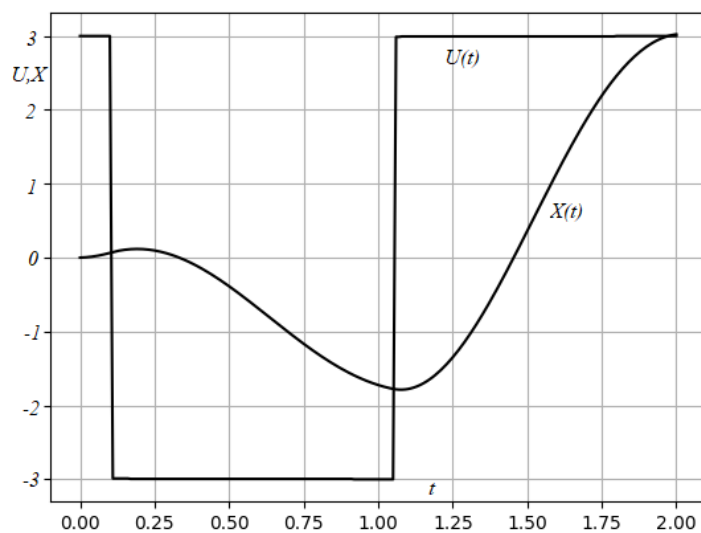


Рис. 5. Пример работы алгоритма с достижением ограничения ($u=3$)

Рис.3 иллюстрирует случай, когда ограничения фазовой переменной не достигаются. Рис.4-5 показывают, что после достижения ограничения и увеличения модуля управления, процесс достижения максимальной величины не изменяется, как и ее значение.

Результат работы алгоритма доказывает применимость нейронных сетей в численных алгоритмах расчета квазиоптимального управления. Для его успешной работы необходимо обучить нейроимитатор на точное повторение динамики объекта управления.

Вывод. Определение квазиоптимального управления представляет собой сложную задачу, которую не всегда возможно решить с помощью аналитических методов. В таких ситуациях прибегают к численным методам, одним из которых является алгоритм Черноусько-Крылова. Однако этот метод имеет свои ограничения, поскольку не может быть использован для высокопорядковых систем с нелинейными характеристиками. Применение нейроимитатора системы помогает не только преодолеть указанную проблему, но и решить другие задачи, такие как точный расчет градиента оптимизируемого функционала и нахождение квазиоптимального управления для систем, рассматриваемых как «черные ящики». Тем не менее, данная методика также обладает недостатком: вычислительные затраты на обучение нейронной сети увеличиваются с повышением порядка исследуемой системы.

Список литературы

1. Diveev A., Konstantinov S. Applying Neural Networks for the Identification of Control Object Mathematical Models for the Control Problems, 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Istanbul, Turkey, 2022, P. 1059-1063. DOI: 10.1109/CoDIT55151.2022.9803986.
2. Naing N.N., Z. Min Khaing, Naing Z.M. Development of Methodology for System Identification of Non-linear System Using Radial Basis Function Neural Network // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2020. St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 2390-2394. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039297.
3. Hongliang L., Derong L., Ding W. Neural-network-based optimal control for discrete-time nonlinear systems using general value iteration // Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, 2012. Hefei, China. P. 2932-2937.
4. J. K. P. Tsoi, N. D. Patel and A. K. Swain, "Grey-Box Neural Network System Identification with Transfer Learning on Ball and Beam System," 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Rio de Janeiro, Brazil, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/IJCNN.2018.8489103.

5. H. Xu and S. Jagannathan, "Neural Network-Based Finite Horizon Stochastic Optimal Control Design for Nonlinear Networked Control Systems," in IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 26, no. 3, pp. 472-485, March 2015, doi: 10.1109/TNNLS.2014.2315622.

6. R. Moghadam, P. Natarajan, K. Raghavan and S. Jagannathan, "Online Optimal Adaptive Control of a Class of Uncertain Nonlinear Discrete-time Systems," 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Glasgow, UK, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/IJCNN48605.2020.9206724.

7. Yuanyuan S., Baisen Z. Optimal Control Via Neural Networks: A Convex Approach // ICLR Conference. 2019.

8. Крылов И.А. Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления / И.А. Крылов, Ф.Л. Черноусько // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1972. Т. 12, № 1. С. 14-34.

9. Feofilov S.V., Kozyr A.V., Khapkin D.L. Structural and Parametric Synthesis of Neural Network Controllers for Control Objects with Limiters. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2023. 24(11). P. 563-572.

10. Nair V. Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines, Proceedings of the 27th International Conference on International Conference on Machine Learning : ICML'10, Haifa, Israel. Madison, WI, USA: Omnipress, 2010. P. 807-814.

11. Lecun Y. Gradient-based learning applied to document recognition, Proceedings of the IEEE. 1998. Т. 86. № 11. P. 2278-2324.

12. Feofilov S.V., Khapkin D.L. Application of Recurrent Neural Networks in Closed-loop Tracking Systems for Controlling Essentially Nonlinear Objects // Proceedings of 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk: IEEE, 2021. P. 467-472.

Феофилов Дмитрий Сергеевич, лаборант, fd19072002@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

APPLICATION OF NEURO-SIMITATORS IN THE PROBLEM OF FINDING QUASI-OPTIMAL CONTROL OF A NONLINEAR OBJECT

D.S. Feofilov

The problem of finding quasi-optimal control of a complex dynamic object containing nonlinearity under incomplete information conditions is difficult to solve. One of the problems in solving it is the impossibility of using analytical approaches, such as the Pontryagin maximum principle. This is due to the fact that the description of such systems using differential equations has discontinuous right-hand sides. Another feature is the lack of information about the control object. All that is known about it is that it contains nonlinearity from a known class, as well as its response to various control actions. Such an object is called a

"gray box". In this paper, we consider the problem of finding quasi-optimal software control of a complex dynamic object containing nonlinearity under incomplete information conditions. To solve it, the authors propose to apply a modified numerical method based on the Pontryagin maximum principle and the algorithm of successive approximations, developed by F. L. Chernousko and I. A. Krylov, using a neurosimulator of the control object that accurately repeats its dynamics. An example of the operation of the presented method is given.

Key words: quasi-optimal control, artificial neural network, Chernousko-Krylov method, Pontryagin maximum principle.

Feofilov Dmitry Sergeevich, laboratory assistant, fd19072002@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.67

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-125-126

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ BIG DATA И AI В СОВРЕМЕННЫХ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАХ

Н.А. Епрынцева

Данная статья посвящена современным информационным технологиям и выявлению особенностей их использования в нынешних экономических и социальных условиях. Была изучена специфика использования технологий BIG DATA и AI в современных условиях ведения бизнеса. Также были определены теоретические особенности использования искусственного интеллекта на нынешнем этапе развития IT-индустрии. Помимо этого, было изучено состояние нынешнего уровня развития информационных инструментов, применяемых в отечественной бизнес-среде. Изучены современные тенденции использования информационных технологий, а также определены проблемы их применения в бизнес-процессах и выявлены мероприятия, связанные с возможностями развития применения искусственного интеллекта, а именно технологий BIG DATA и AI на опыте отечественных организаций. Также были представлены основные тенденции и тренды, актуальные на сегодняшний день.

Ключевые слова: Информационные технологии, IT-индустрия, искусственный интеллект, IT-технологии, BIG DATA, автоматизация, машинное обучение.

В настоящее время информационные технологии являются одним из основных инструментов, влияющих на конкурентоспособность товаров и услуг, а также на развитие экономики в целом. Информационные технологии сегодня используются практически во всех сферах деятельности человека.

В условиях растущей конкуренции и постоянно меняющихся требований клиентов компании вынуждены искать новые способы решения задач, возникающих в процессе работы. В настоящий момент информационные технологии активно применяются во всех областях экономиче-

ской деятельности для решения широкого круга задач, связанных с организацией и управлением производства, обработкой больших объемов данных, анализом бизнес-процессов, созданием новых видов продукции, внедрением систем поддержки принятия решений и т.д. В связи с этим особое значение приобретает вопрос о том, как наиболее эффективно использовать полученные технические и программные средства [2, с. 37].

В настоящее время в России активно развиваются информационные технологии, которые позволяют организациям эффективно управлять своим бизнесом. В связи с этим, происходит рост спроса на программное обеспечение, имеющее широкие функциональные возможности. При этом требования к нему со стороны пользователей весьма высоки. Чтобы данные требования удовлетворять, многие организации необходимым образом внедряют и создают те или иные информационные инструменты, которые могут повлиять на развитие IT-индустрии [3, с. 81].

В результате развития информационных технологий в последние годы значительно изменились и представления об их использовании. Так, в соответствии с концепцией информационного общества, данные и знания являются главными ресурсами, определяющими экономический и социальный рост общества. Информационные технологии должны стать основой формирования в России информационного общества и способствовать переходу к инновационному типу развития экономики.

На сегодняшний день рынок программных продуктов для бизнес-процессов представлен широким спектром компаний, предлагающих свое видение решения задач по автоматизации бизнеса. Данный рынок генерирует инновационные тенденции, связанные с IT-индустрией.

Инновационные тенденции представляют собой диверсификацию, индивидуализацию и развитие информационных технологий, их интенсификация и компьютеризация, а также развитие принципов цикличности и многоступенчатости. Все эти тенденции должны способствовать возрастанию качества мирового рынка информационных технологий в соответствии с современными требованиями социально-экономического развития общества [7, с. 121].

Далее следует определить специфику использования технологии BIG DATA и AI в современных бизнес-процессах. Первоначально следует ознакомиться с теоретическим аспектом применения данных технологий.

Big Data или большие данные – это наборы данных большого объема, которые могут быть структурированными или неструктурированными. Они собираются из различных источников, таких как интернет, социальные сети, корпоративные системы и т.д. Это технология, которая позволяет собирать, хранить, анализировать и использовать большие объемы данных для получения необходимой информации для улучшения эффективности работы процессов. Big Data используется для анализа и выявления тен-

денций и закономерностей в данных. Это позволяет компаниям и организациям принимать более обоснованные решения на основе анализа этих данных.

На сегодняшний день, в крупнейших международных компаниях, Big Data является эффективным инструментом цифровизации и увеличения эффективности бизнес-процессов [9, с. 116].

Big Data позволяет работать с огромными массивами данных и получать на выходе нужную информацию. В социальных сетях и логистических сайтах участники логистических отношений делятся различным опытом, но извлечение подобных данных вручную является трудоёмким процессом. В результате обработки больших массивов данных пользователь получает возможность, не прибегая к помощи специалистов, выявить какие-либо закономерности, которые он может использовать в дальнейшем для принятия тех или иных решений.

Таким образом, инструменты «Больших Данных» являются набором технологий, инструментов, методов и подходов, предназначенных для решения проблемы обработки больших объемов данных, а также объемы данных, которых нельзя обработать общепринятыми способами, то есть вручную [6, с. 10].

Определим основные методы сбора данных для инструмента Big Data и более подробно разберем их:

SQL – язык программирования, который позволяет создавать, обрабатывать и хранить данные в реляционных базах данных;

NoSQL – системы управления БД, предназначенные для масштабирования за счёт полного или частичного отказа от требований атомарности и согласованности данных;

MapReduce – модель распределённых вычислений, используемая для параллельных вычислений над очень большими данными. Этот метод, подразделяющийся на 2 способа обработки данных. Map – отбирает предварительные данные. Reduce – агрегирует данные;

Hadoop – используется для реализации поисковых и контекстных механизмов многих высоконагруженных веб-сайтов, связанных с поиском (Facebook, eBay, Amazon);

SAP HANA – предоставляет высокую скорость обработки запросов, а также облегчает системный ландшафт, снижая затраты на обеспечение аналитических систем [4, с. 20].

Далее разберем технологию AI. Это область науки и технологии, которая занимается созданием интеллектуальных систем, способных выполнять задачи, которые обычно требуют человеческого интеллекта. Интеллектуальные системы могут быть как компьютерными программами, так и физическими устройствами, например, роботами. AI используется для решения различных задач, таких как распознавание речи, обработка естественного языка, машинное зрение и т.д.

Искусственный интеллект пересекается со многими аспектами жизни людей, от смартфонов и голосовых помощников до медицинских диагностических систем и автономных автомобилей. Все это возможно благодаря сильному прогрессу, достигнутому в этой области в последние десятилетия. Это открывает множество возможностей для улучшения качества жизни людей и автоматизации процессов.

Далее определим влияние BIG DATA и AI на современные бизнес-процессы. Как крупные компании, так и представители малого бизнеса используют инструменты BIG DATA и AI. При этом, малый бизнес более динамичен, а также конкуренция в нем намного больше, чем у крупных предприятий. Однако, сложность вызывает стоимость различных проектов, которую малый бизнес не готов платить за разработку. Поэтому большие компании привлекают к работе представителей малого бизнеса, а представители малого и среднего бизнеса не разрабатывают IT-решения самостоятельно, а обращаются к готовым продуктам.

Основные сферы применения Big Data в бизнесе включают прогнозирование спроса и поведения клиентов, аналитику продаж, оптимизацию производственных процессов, наем сотрудников, оценку платежеспособности будущих партнеров и выявление недобросовестных контрагентов [5, с. 322].

Big Data также используется для улучшения качества обслуживания клиентов, разработки новых продуктов и услуг, управления рисками, улучшения логистики и сокращения издержек. Кроме того, Big Data может помочь бизнесу адаптироваться к изменениям на рынке и предсказать будущие тренды.

Big Data позволяет анализировать различные аспекты бизнеса, и число технологий для работы с большими объемами данных постоянно растет. Использование облачных сервисов и интеграция с бизнес-системами ускоряют процесс внедрения инструментов для анализа больших объемов данных. Для некоторых компаний этот инструмент становится катализатором роста и помогает осваивать новые рынки.

Искусственный интеллект помогает бизнесу прогнозировать спрос и увеличивать объемы продаж, автоматизировать взаимодействие с клиентами, оптимизировать логистические и производственные процессы, регулировать низкую степень финансовых рисков и т.д.

Далее изучим основные проблемы использования BIG DATA и AI в бизнес-среде и изучим основные тенденции развития использования данных инструментов.

Как правило, что у BIG DATA, что и у искусственного интеллекта определяются 3 основных группы проблем: объем, скорость обработки и неструктурированность. Проблема объема характеризует собой недостаточность условий для хранения данных. Скорость относится не только к проблеме медленной обработки информации, которая вызвана старыми

методами обработок, но и к взаимодействию с другими факторами. Проблема неструктурированности может актуализироваться из-за разрозненности источников. Иной проблемой может стать алгоритм анализа и выбор данных для обработки информации, так как нет конкретного понимания, какую информацию следует собирать и хранить, а какую можно исключать. Так же очевидно присутствует нехватка квалифицированных специалистов в данной области. Еще одна кадровая проблема может быть вызвана тем фактом, что искусственный интеллект, в своей перспективе, может заменить труд людей. Некоторые профессии могут быть заменены в ближайшем будущем. Труды дизайнеров, писателей, маркетологов, а также актеров и прочих представителей профессий, от автомойщиков и кассиров в супермаркетах, вплоть до машинистов поездов и самолетов, могут обесцениться за счет развития инструментов искусственного интеллекта и BIG DATA [8, с. 137].

Тем не менее, нужно задавать необходимые параметры по отбору данных. Отсюда раскрывается проблема недостаточной компетенции людей, которые занимаются координацией и настройкой инструментов BIG DATA и ИИ. Также большие данные могут неправильно интерпретировать или неверно расставлять приоритеты. Для улучшения качества использования данных инструментов, крупным компаниям следует особое внимание уделять на специалистов, ответственных за использование данными технологиями. Специалист не только должен владеть IT-навыками, но и уметь анализировать данные. Правильное изучение больших данных может спрогнозировать тренды потребительского предпочтения, дальнейшие пути ведения бизнеса и т.д. [1, с. 55].

По оценке экспертов Fortune Business Insights, рынок больших данных ежегодно растет на 13,4%, а значит, что к 2029 году он увеличится до \$655,53 млрд. Объем данных, накопленных человечеством, к 2025 году составит 180 зеттабайт. Усилится структуризация данных, компании научатся быстрее отсеивать ненужную информацию. Когнитивные системы позволят чаще и более гибко анализировать данные во многих отраслях и во многих ситуациях, а автоматизация и межмашинное взаимодействие станут основными конкурентами традиционных источников в области создания данных [10].

Таким образом, следует сделать вывод, что развитие инструментов Big Data и искусственного интеллекта неизбежно, и это понимают все основные представители бизнеса, от малых IT-компаний, до крупнейших лидеров рынка. Представители бизнес-среды должны принимать существующую реальность и внедрять данные инструменты в свой бизнес, для его оптимизации и развития эффективности бизнес-процессов.

Список литературы

1. Абдыкаримова А. Т. BIG DATA: проблемы и технологии // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. С. 55–57.

2. Машевская О. В. Цифровые технологии как основа цифровой трансформации современного общества // Вестник Полесского государственного университета. Серия общественных и гуманитарных наук. 2020. № 1. С. 37-44.

3. Пастухова Е. В. Искусственный интеллект: исследования в эпоху Big data // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXV Международной научной конференции. СПбГУАП. 2022. С. 81-85.

4. Пилецкая А. В. Искусственный интеллект и большие данные // Молодой ученый. 2019. № 50 (288). С. 20-22.

5. Федорова Л. А. Применение технологий big data в деятельности современных предприятий // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2020. № 9 С. 322–329.

6. Черных К. А. Применение технологий Big Data // Молодой ученый. 2022. № 46 (441). С. 8-11.

7. Якимов А.В. Особенности развития инновационных систем в ситуации пандемийного кризиса // Инвестиции и бизнес. 2022. №2. С.121-124.

8. Chen Y. Big Data Platform of Air Traffic Management / Y. Chen, L. Zhou, J. Yang et al. // IEEE International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), Kunming, China. 2019, pp. 137-141.

9. Wilson J., Daugherty P. R. Humans and AI are joining forces // Harvard Business Review. 2018. № 96 (4). pp. 115-123.

10. Современный бизнес и Big Data: анализ применений, результатов и перспектив в крупных компаниях и малом бизнесе. [Электронный ресурс] URL: <https://dzen.ru/a/ZG5BkcHKIDSQfYQW> (дата обращения: 10.05.2024).

Епрынцева Наталия Александровна, канд. техн. наук, доцент, epnat@mail.ru, Россия, Воронеж, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова

FEATURES OF USING BIG DATA AND AI TECHNOLOGY IN MODERN BUSINESS PROCESSES

N.A. Epryntseva

This article is devoted to modern information technologies and identifying the features of their use in the current economic and social conditions. The specifics of using BIG DATA and AI technologies in modern business conditions were studied. The theoretical features of using artificial intelligence at the current stage of development of the IT industry were also determined. In addition, the state of the current level of development of information tools used in the domestic business environment was studied. Modern trends in the use of information technologies were studied, as well as problems of their application in business processes were identified and activities related to the possibilities of developing the use of artificial intelligence, namely BIG DATA and AI technologies, based on the experience of domestic

organizations were identified. The main trends and tendencies that are relevant today were also presented.

Key words: Information technology, IT industry, artificial intelligence, IT technologies, BIG DATA, automation, machine learning.

Epryntseva Natalia Aleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, eprnat@mail.ru, Russia, Voronezh, Voronezh branch of Plekhanov Russian University of Economics

УДК 004.94:621.791

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-131-132

СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.Г. Новиков

В статье представлен сравнительный анализ современных программных решений для моделирования сварочных процессов. Рассмотрены основные характеристики и функциональные возможности каждого программного продукта, включая методы расчета, способность учитывать микроструктурные изменения, остаточные напряжения и деформации. Проведено сопоставление программ по ключевым параметрам, таким как назначение моделирования, метод расчета, возможности учета различных физических явлений и особенности геометрического моделирования. Представлены рекомендации по выбору программного обеспечения в зависимости от специфики решаемых задач. Особое внимание уделяется сравнительному анализу функциональных возможностей каждой программы, включая их способность моделировать различные типы сварки, учитывать микроструктурные изменения материалов, рассчитывать остаточные напряжения и деформации. В статье представлена сравнительная таблица, наглядно демонстрирующая ключевые характеристики рассматриваемых программных продуктов.

Ключевые слова: программное обеспечение, анализ информации, сравнение программных комплексов, сварочные процессы, термообработка, компьютерное моделирование.

В современном мире сварка является одним из технологических процессов в различных отраслях промышленности, таких как машиностроение, судостроение, авиастроение и строительство, она используется. Сварка – это технологический процесс соединения двух и более металлических или неметаллических материалов посредством нагрева, плавления или с использованием давления [1-4]. Главный принцип сварки заключается в создании неразъемного соединения материалов, где соединение образуется за счет локального плавления поверхностей или применения давления [5-8].

Для оптимизации процесса сварки и повышения качества сварных соединений используются специализированные программные решения для моделирования.

1. SYSWELD - это программный комплекс, предназначенный для моделирования различных процессов сварки и термической обработки материалов. Он позволяет инженерам и исследователям симулировать такие методы сварки, как дуговая, лазерная и электронно-лучевая. Благодаря использованию метода конечных элементов, SYSWELD (рис. 1) способен точно рассчитывать температурные поля, напряжения и деформации, возникающие в процессе сварки. Программа отличается удобным и интуитивно понятным пользовательским интерфейсом, а также содержит обширную базу данных различных свариваемых материалов. Она предоставляет возможность оценки вероятности образования трещин в сварном соединении, определения микроструктуры шва и околошовной зоны. Кроме того, программа позволяет последовательно моделировать весь процесс сборки и сварки конструкции, рассчитывать твердость любого соединения или области конструкции. Помимо моделирования сварки, SYSWELD также позволяет симулировать процессы термической обработки материалов.

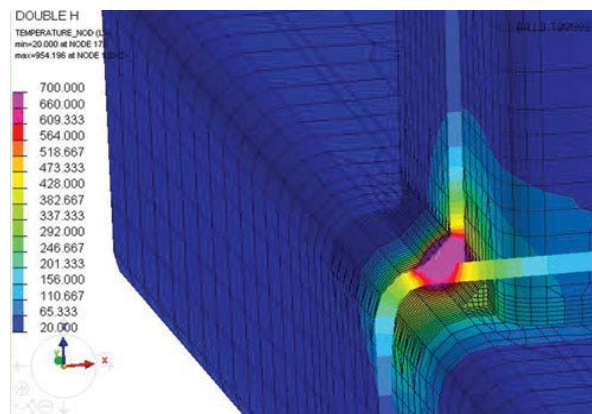


Рис. 1. К вопросу о применении SYSWELD для расчета сварки [9]

2. Simufact Welding - это специализированное ПО для моделирования. Оно (рис. 2) позволяет прогнозировать остаточные напряжения, деформации и риск образования трещин в сварных соединениях. Поддерживает различные методы сварки и имеет возможность импорта геометрии из CAD-систем. Программа также предлагает инструменты для оптимизации параметров сварки и последовательности наложения швов.

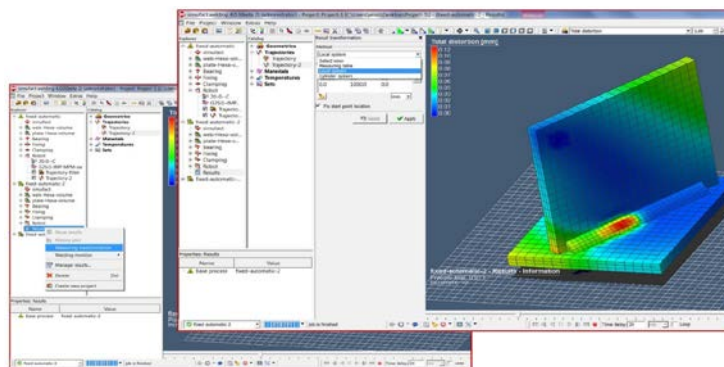


Рис. 2. К вопросу о применении Simufact Welding для расчета сварки [10]

3. ANSYS Workbench Additive - это модуль ПО ANSYS, предназначенный для моделирования аддитивных технологий, включая сварку. Он позволяет симулировать процессы наплавки и 3D-печати металлических изделий. ANSYS Workbench Additive использует метод конечных элементов для расчета температурных полей и напряженно-деформированного состояния в процессе сварки. Программа имеет широкие возможности по настройке параметров процесса и визуализации результатов.

4. Bazis - это профессиональное программное обеспечение для инженерного анализа процессов сварки и термической обработки металлов. Программой возможно анализировать механические свойства материалов, исследовать влияние температурных режимов на структуру и проводить компьютерные симуляции для выявления слабых мест еще до физической реализации. Визуализация результатов анализа упрощает принятие решений в ходе проектирования и разработки изделий. Широко применяется в строительной и автомобильной отраслях, а также в производстве для автоматизации процессов термообработки.

Далее проводится более детальный сравнительный анализ представленных программных обеспечений (см. табл.).

Сравнительный анализ программного обеспечения

Параметр	SYSWELD	Ansys	Bazis	Simufact Welding
Назначение моделирования	сварка и термическая обработка	многоцелевой	сварка	сварка и термическая обработка
Метод расчета	МКЭ	МКЭ	МКЭ	МКЭ
Учет микроструктуры	Да	Нет	Нет	Да
Учет остаточных напряжений	Да	Да	Да	Да
Учет деформаций	Да	Да	Да	Да
Моделирование геометрии	2D, 3D	2D, 3D	2D, 3D	3D

Все рассмотренные программы используют метод конечных элементов для расчета температурных полей, напряжений и деформаций. SYSWELD и Simufact Welding позволяют учитывать изменения микроструктуры материала в процессе сварки и термической обработки, что важно для прогнозирования свойств сварного соединения. ANSYS и Bazis не имеют специальных инструментов для учета микроструктуры.

Сравнивая эти программные продукты, можно отметить, что все они предлагают широкие возможности для моделирования процессов сварки и термической обработки. SYSWELD и Simufact Welding имеют более специализированную направленность на сварочные процессы, в то время как ANSYS Workbench Additive предлагает дополнительные возможности для моделирования аддитивных технологий.

По мнению автора, если для задачи важно учитывать микроструктуру и термообработку, наиболее подходящими инструментами будут SYSWELD и Simufact Welding. Для многоцелевого использования с учетом остаточных напряжений и геометрического моделирования можно использовать Ansys. Bazis подойдет для задач, в которых требуется только сварка без сложного учета микроструктуры. Выбор конкретного программного обеспечения зависит от специфики решаемых задач, доступного бюджета и предпочтений пользователя. В любом случае, использование программных решений для моделирования сварки позволяет существенно повысить качество сварных соединений, снизить риск образования дефектов и оптимизировать технологический процесс.

Список литературы

1. Сварка и свариваемые материалы: Справочник. Т. 1 / Под редакцией Э.Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991. 528 с.
2. Чернышов Г. Г. Основы теории сварки и термической резки металлов / Г.Г. Чернышов. М.: Академия, 2010. 208 с.
3. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т.3. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 557с
4. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения: методы и их устранения / В.А. Винокуров. М.: Машиностроение, 1968. 235 с.
5. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах М.: Металлургия, 1989. 384 с.
6. Технологические основы сварки и пайки в авиастроении / [В. А. Фролов, В. В. Пешков, А. Б. Коломенский, В. А. Козаков]. М.: Интернет инжиниринг, 2002. 455 с.
7. Шебеко Л. П. Оборудование и технология автоматической и полуавтоматической сварки. М., Высш. школа. 1975, 344 с.
8. Аргоно-дуговая сварка алюминиевых сплавов для строительных конструкций / Коллектив авторов. М.: Книга по Требованию, 2012. 180 с.
9. Применение SYSWELD для исследования сварочных деформаций // САПР [Электронный ресурс] URL: <https://sapr.ru/article/21948> (дата обращения: 11.10.2024).
10. New Simufact.welding 4 presented at EuroBLECH 2014 // Metal-Working World Magazine [Электронный ресурс] URL: <https://www.metalworkingworldmagazine.com/new-simufact-welding-4-presented-at-euroblech-2014> (дата обращения: 11.10.2024).

Новиков Владислав Геннадьевич, инженер-технолог, therealnovikov@gmail.com, Россия, Тула, АО «ПО Тульский машиностроительный завод им. Рябикова»

COMPARISON OF SOFTWARE FOR MODELING WELDING PRODUCTION PROCESSES

V.G. Novikov

The article presents a comparative analysis of modern software solutions for modeling welding processes. The main characteristics and functionality of each software product are considered, including calculation methods, the ability to take into account microstructural changes, residual stresses and deformations. The programs were compared according to key parameters, such as the purpose of modeling, the calculation method, the possibility of accounting for various physical phenomena and the features of geometric modeling. Recommendations on the choice of software are presented, depending on the specifics of the tasks being solved. Special attention is paid to a comparative analysis of the functionality of each program, including their ability to simulate different types of welding, take into account microstructural changes in materials, and calculate residual stresses and deformations. The article presents a comparative table that clearly demonstrates the key characteristics of the software products under consideration.

Key words: software, information analysis, comparison of software packages, welding processes, heat treatment, computer modeling.

Novikov Vladislav Gennadievich, process engineer, therealnovikov@gmail.com, Russia, Tula, JSC «PO Tula Machine-Building Plant named after. Ryabikov»

УДК 004.654

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-135-136

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ СВОЕВРЕМЕННОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ БАЗ ДАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А.В. Удальцов

В статье рассматривается методика повышения своевременности синхронизации баз данных в автоматизированных системах специального назначения. Методика включает мониторинг актуальности информационных ресурсов и использование обучения с подкреплением для оптимизации периодов синхронизации. Предложенные алгоритмы и методы позволяют значительно повысить своевременность синхронизации данных между пунктами управления, что минимизирует риски принятия некорректных управленческих решений. Эффективность методики подтверждена на примере имитационной модели.

Ключевые слова: синхронизация баз данных, актуальность информации, система поддержки принятия решений, информационные ресурсы, имитационное моделирование, AnyLogic.

В современных автоматизированных системах специального назначения (АС СН) управление осуществляется в иерархической структуре, где каждый уровень представляют собой пункты управления (ПУ). На каждом ПУ развёрнута система с веб приложением клиент-серверным специальным программным обеспечением, обеспечивающая обработку и обновление данных в реальном времени. Однако ПУ территориально удалены друг

от друга, что затрудняет синхронизацию данных между ними. С целью обеспечения устойчивости управления, ПУ между собой архитектуру баз данных типа сервер-сервер.

Процесс синхронизации баз данных (БД) между ПУ и заключается в передаче данных с нижестоящего ПУ на вышестоящий посредством специального файла. Этот файл формируется и отправляется в соответствии с регламентом, установленным для каждого ПУ. Вышестоящий ПУ, получив данный файл, вручную обрабатывает его и вносит изменения в свою базу данных через клиентские приложения.

Основная проблема, с которой сталкиваются автоматизированные системы, заключается в несвоевременной синхронизации данных [1]. Изменения в базах данных на нижестоящих ПУ происходят часто, однако регламентированная периодичность отправки специальных файлов не всегда позволяет поддерживать актуальность данных на вышестоящих ПУ. Это может приводить к значительным расхождениям в данных между уровнями системы и, как следствие, к принятию некорректных управленческих решений.

Для решения данной проблемы разработана методика, направленная на повышение своевременности синхронизации баз данных. Основной её задачей является мониторинг вероятности актуальности информационных ресурсов (ИР) и автоматическая сигнализация в случае необходимости срочной синхронизации данных. Это позволяет оперативно обновлять данные на вышестоящих ПУ, минимизируя расхождения и обеспечивая более точное и своевременное принятие решений [2].

Данная методика состоит из четырех этапов: формирование исходных данных; выбора варианта действия агента и обучение с подкреплением; организация хранения значений Q матрицы; оценка повышения своевременности синхронизации баз данных и формулирования рекомендаций для внесения изменений в регламент.

Основные этапы разработанной методики представлены на рисунке 1. Перейдем к подробному рассмотрению каждого этапа методики.

На первом этапе формируется (синтезируется) исходные данные о том, какие таблицы участвовали в информационном обмене и как частота происходили изменения, обосновываются требования к сети и структура представления выходных данных. Алгоритм формирования исходных данных методики состоит из 3 шагов.

Шаг 1. Подключение к журналу событий осуществляется администратором баз данных, для этого предоставляются доступ и путь к каталогу с местонахождением файлов журнала событий базы данных [3].

Шаг 2. Работу блока «Анализ журнала» можно представить в виде теории множеств. Пусть в базе данных есть конечное количество таблиц:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}, \quad (1)$$

где t_i - имя (уникальный идентификатор) i -й таблицы.

Журнал событий баз данных (ЛОГ) можно представить как множество ЛОГ $L = \{L_1, L_2, \dots, L_M\}$. Каждая запись представлена в виде следующего кортежа:

$$l_i = \langle \text{Timestamp}_i, \text{Log\_level}_i, \text{pid}_i, \text{ip\_client}_i, \text{table\_name}_i, \text{User}_i, \text{session\_ID}_i, \text{text} \rangle. \quad (2)$$



Рис. 1. Этапы методики повышения своевременности синхронизации баз данных автоматизированных систем специального назначения

Пусть существует конечное множество операций, связанных с изменениями данных $O = \{insert, update, delete\}$, тогда каждую запись $l_{mi} \in L$, можно описать вектором:

$$l_{mi} = \{t_{mi}, o_i, d_i\}, \quad (3)$$

где $t_i \in T$ - таблица, которая была изменена; $o_i \in O$ - операция, связанная с изменением данных; d_i - временная метка событий.

Тогда существует функция, которая отображает записи ЛОГ на количество изменений каждой таблицы:

$$f(t) = |\{l_i \in L \mid l_i \cdot t_i = t\}|, \forall t \in T, \quad (4)$$

Функция (4) подсчитывает, сколько раз каждая таблица была изменена. Для хранения этой информации используется вектор:

$$F = [f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_k)], \quad (5)$$

где F - вектор частоты изменения; $f(t_i)$ - число изменений таблицы t_i .

Для получения временной метки последнего изменения $t \in T$:

$$g(t) = \max\{d_i \mid l_i \cdot t_i = t\}, \quad (6)$$

где функция $g(t)$ вычисляет максимальное значение времени из всех записей, относящихся к данной таблице результаты представляются в виде вектора:

$$G_T = [g(t_1), g(t_2), \dots, g(t_k)], \quad (7)$$

Таким образом, блок «Анализ журнала» можно представить также в виде алгоритма из 3 шагов.

Шаг 1 выполняет фильтрацию лога на основе регулярных выражений и извлекаются строки, содержащие информацию о таблицах и операциях. Формируется множество записей L .

В шаге 2 происходит вычисление вектора F , который показывает, сколько раз изменялась каждая таблица.

В шаге 3 определяется вектор G , который содержит временные метки последних изменений каждой таблицы.

На шаге «Получение исходных данных» осуществляется преобразование в матрицу A :

$$A_{ij} = |\{l_p \in L \mid l_p \cdot t_i = t_i \wedge l_p \cdot o_i = o_j\}|, \quad (8)$$

где i – таблица, j – тип операции. A_{ij} показывает, сколько раз была выполнена операция o_j на таблице t_i .

Пример работы программы: допустим, ЛОГ содержит следующие записи, для наглядности ЛОГ был упрощен, убрана вся служебная и не используемая информация.

$$L = \{ \{table1, insert, 2024-12-01\ 12:00\}, \\ \{table2, update, 2024-12-01\ 12:05\}, \\ \{table1, delete, 2024-12-01\ 12:10\} \}$$

Множество таблиц: $T = \{table1, table2\}$.

Множество операций: $O = \{insert, update, delete\}$.

По формуле (3.5) получаем частоту изменений $F=[2,1]$, а по формуле (3.7) вектор $G=[2024-12-01\ 12:10, 2024-12-01\ 12:05]$.

Тогда итоговая матрица A будет:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

где первая строка – изменения *table1*, вторая строка – изменения *table2*, а столбцы соответствуют операциям *insert, update delete*.

На втором этапе выбирается действие агента и происходит его обучение. Обучение с подкреплением представляется как система, где агент взаимодействует со средой, получая информацию о её состоянии и выбирая действия на основе этих данных. Среда, приняв действие, переходит в новое состояние и возвращает агенту информацию о новом состоянии и вознаграждение. Цикл «состояние-действие-вознаграждение» повторяется до завершения задачи, например, до решения поставленной проблемы [4]. Полный процесс показан на рисунке 2.

Функция, с помощью которой агент принимает решения, называется стратегией. Она представляет собой функцию, которая сопоставляет каждому состоянию оптимальное действие. Действие, в свою очередь, изменяет среду и влияет на дальнейшие наблюдения и выборы агента. Обмен

информацией между агентом и средой происходит во времени, что можно рассматривать как процесс последовательного принятия решений.

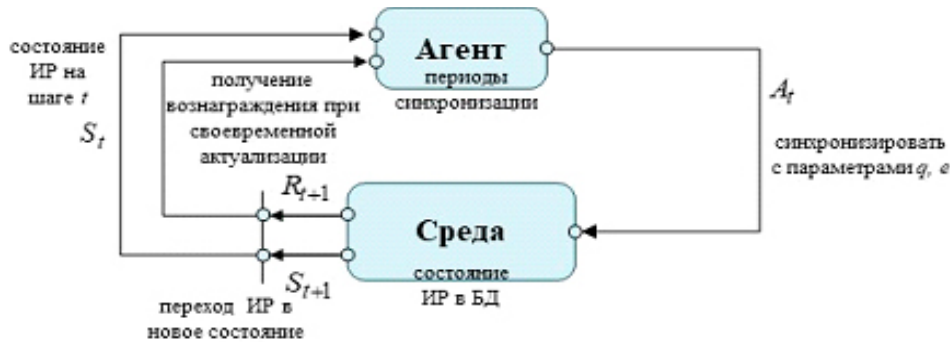


Рис. 2. Цикл управления агентом в обучении с подкреплением

В задачах обучения с подкреплением цель агента – максимизировать целевую функцию, которая представляет собой сумму всех полученных вознаграждений. Для этого агент взаимодействует со средой методом проб и ошибок, используя поощрительные сигналы для подкрепления оптимальных действий.

Агент и среда рассматриваются как независимые сущности, что позволяет чётко разделять состояния, действия и вознаграждения. Среда включает всё, что не является частью агента. По сути, обучение с подкреплением реализует цикл управления с обратной связью, в котором агент и среда обмениваются сигналами, а агент стремится максимизировать целевую функцию [5].

Теперь можно представить формулировку задачи обучения с подкреплением в виде модели Марковского процесса принятия решений (МППР) для своевременной синхронизации баз данных. МППР определяется кортежем из четырех элементов – $S, A, P(\cdot), \mathcal{R}(\cdot)$ где:

$s_t \in S = \{s_0, s_1, s_2, s_3\}$, где S набор состояний, s_0 - синхронизация никогда не проводилась, s_1 - ИР находится в неактуальном состоянии, s_2 - ИР находится в актуальном состоянии, s_3 - была проведена синхронизация;

$a_t \in A = \{a_0, a_1 \dots a_q\}$, $a_i = \{1, 2, \dots, q\}$, где A – набор действий, a_t множество действий синхронизации с различными периодами от 1 до q ;

$P(s_{t+1} | s_t, a_t)$ – функция перехода состояний среды, соответствует $P_{акт}$ каждого ИР;

$\mathcal{R}(s_t, a_t, s_{t+1})$ – функция вознаграждения среды, представленная

матрицей:
$$\mathcal{R}(s_t, a_t, s_{t+1}) = \begin{pmatrix} -1 & \otimes & \otimes & 1 \\ \otimes & -1 & 1 & \otimes \\ \otimes & -1 & 1 & \otimes \\ \otimes & -1 & 1 & \otimes \end{pmatrix}.$$

В методике задачи обучения с подкреплением используется предположение: функция переходов $P(s_{t+1} | s_t, a_t)$ и функция вознаграждений $\mathcal{R}(s_t, a_t, s_{t+1})$ недоступны для агентов. Они могут получить информацию об этих функциях только через состояния, действия и вознаграждения, воздействию которых подвергаются на данный момент в среде, то есть через кортежи (s_t, a_t, s_{t+1}) .

Как было ранее сказано агент пытается максимизировать целевую функцию, чтобы формализовать понятие целевой функции, определим отдачу $R(\tau)$, используя траекторию из эпизода $\tau = (s_0, a_0, r_0) \dots (s_T, a_T, r_T)$:

$$R(\tau) = r_0 + \gamma r_1 + \gamma^2 r_2 + \dots + \gamma^T r_T = \sum_{t=0}^T \gamma^t r_t, \quad (9)$$

В выражении (9) отдача определена как дисконтированная сумма вознаграждений на траектории, где γ — коэффициент дисконтирования, $\gamma \in [0, 1]$. Тогда целевая функция $J(\tau)$ становится просто математическим ожиданием отдачи по нескольким траекториям:

$$J(\tau) = M_{\tau \sim \pi} [R(\tau)] = M_{\tau} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r_t \right] \rightarrow \begin{cases} a_t \rightarrow \max \\ P_{акт,t} \geq P_{акт}^{don} \end{cases} \quad (10)$$

Отдача $R(\tau)$ — это сумма дисконтированных вознаграждений $\gamma^t r_t$ за все временные шаги $t = 0 \dots T$. Целевая функция $J(\tau)$ — это отдача, усредненная по нескольким эпизодам. Математическое ожидание предполагает случайный характер выбора действий и поведения среды, то есть при повторных запусках отдача не всегда будет одинаковой. Максимизация целевой функции — то же самое, что и максимизация отдачи. При условии, что вероятность нахождения в актуальном состоянии ИР будет не ниже требуемой вероятности.

Смену состояний для обучения агента для нахождения оптимальных периодов синхронизации можно представить как на рисунке 3.

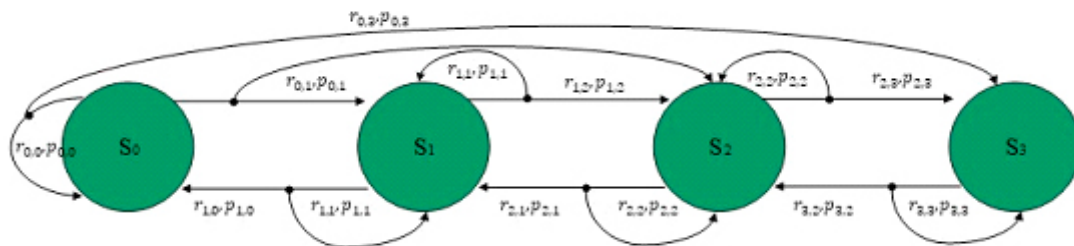


Рис. 3. Граф смены состояний s под действиями агента a

Агент принимает решение о том, какой период синхронизации использовать на основе текущей информации о состоянии актуальности ИР, полученной после изменения в БД. Этот процесс обучения можно представить как цепочку решений, где агент, может использовать две стратегии: ε -жадную стратегию и стратегию Больцмана.

Агент используя ε -жадную стратегию, взаимодействует с окружающей средой - базой данных и получает обратную связь в виде вознаграждения. Общий алгоритм обучения с подкреплением на основе ε -жадной стратегии представлен на рисунке 4.

Блок 1-3.

Ввод исходных данных для обучения. Настраиваем ε_{min} - параметр для уменьшения значения ε и коэффициент уменьшения $decay$. Это необходимо для обеспечения баланса между исследованием и эксплуатацией.

Блок 4.

Организация цикла обучения для каждого эпизода, выходом из цикла является завершение обучения.

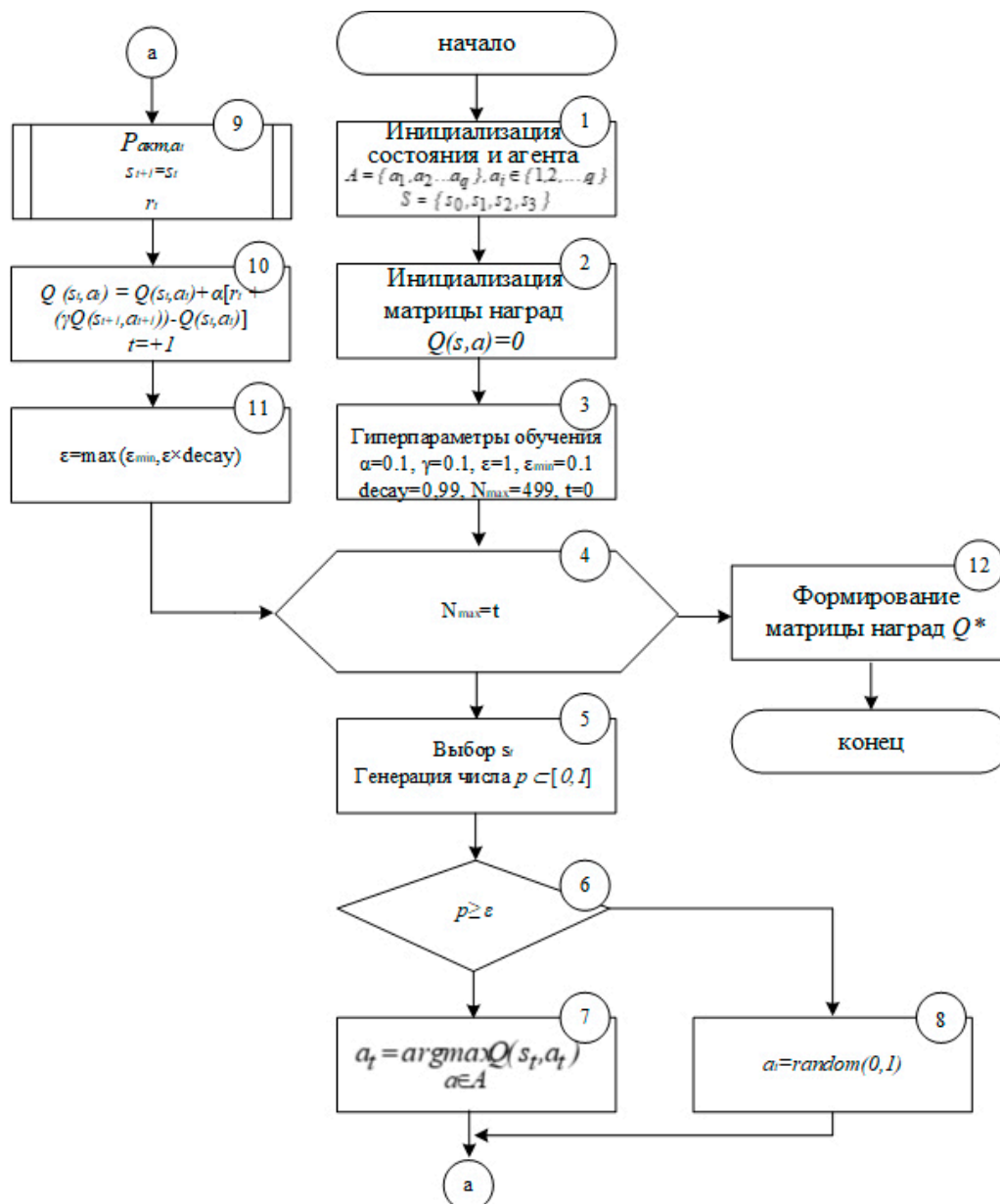


Рис. 4. Алгоритм оптимизации периода синхронизации информационных ресурсов на основе ε -жадной стратегии

Блок 5.

Генерируется случайное число p в диапазоне $[0,1]$. Генерация случайного числа p используется для выбора стратегии действия в рамках ε -жадной политики. Это число определяет, будет ли агент следовать своему текущему знанию эксплуатации или исследовать новые действия исследования.

Блок 6-8.

Если $p \leq \varepsilon$, агент выбирает случайное действие для исследования, что позволяет улучшить изучение среды и избежать заикливания на локальных максимумах. Если $p > \varepsilon$, агент выбирает действие, которое, является наилучшим на основе текущей таблицы $Q(s_t, a_t)$.

Блок 9.

После того как агент выбирает действие a_t (период синхронизации), система на основе модели процесса синхронизации БД АС СН получает вероятность нахождения ИР в актуальном состоянии $P_{акт}$. Оценка эффективности действия производится через функцию вознаграждения r_t , которая зависит от того, как изменился уровень актуальности ИР после применения выбранного действия a_t .

Вознаграждение рассчитывается на основе состояния актуальности ИР до и после синхронизации, что выражено через функцию вознаграждения $r_t = R(s_t, a_t, s_{t+1})$. Если синхронизация улучшила актуальность ИР т.е. $P_{акт} \geq P_{акт}^{доп}$, агент получает положительное вознаграждение, если ухудшила – отрицательное.

Блок 10.

Обновление Q -значений — это основной процесс в обучении с подкреплением, в ходе которого агент корректирует свои представления о полезности действий в конкретных состояниях на основе опыта взаимодействия со средой. Этот процесс основан на использовании функции Беллмана, которая задает рекуррентное выражение для обновления значений $Q(s, a)$. После выполнения действия a_t в состоянии s_t , агент получает информацию о:

следующем состоянии s_{t+1} , в которое он перешел;

вознаграждении r_t , полученном в результате перехода (s_t, a_t, s_{t+1}) .

Вознаграждение r_t отражает полезность выбранного действия для достижения поставленной цели.

Агент использует текущую таблицу Q для оценки максимального значения $Q(s_{t+1}, a)$ среди всех возможных действий a в новом состоянии s_{t+1} . Это значение понимается как лучший ожидаемый результат, который можно достичь из нового состояния. Затем вычисляется временная разница (TD-ошибка) по формуле (11):

$$\delta = r_t + \gamma \max_{a'} Q(s_{t+1}, a') - Q(s_t, a_t) \quad (11)$$

TD-ошибка показывает разницу между ожидаемым вознаграждением и текущей оценкой полезности действия $Q(s_t, a_t)$. На основе этой разницы значение $Q(s_t, a_t)$ обновляется по формуле (12):

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \cdot \delta \quad (12)$$

Этот процесс позволяет агенту уточнять свои оценки $Q(s, a)$, принимая во внимание как ранее полученное вознаграждение, так и накопленные данные о будущем.

Обновленное значение $Q(s_t, a_t)$ сохраняется в таблице Q , которая используется в дальнейшем для выбора действий. Такой цикл повторяется для каждого взаимодействия агента со средой, что способствует постепенному улучшению стратегии действий.

Блок 11.

Для обеспечения баланса между исследованием и эксплуатацией параметр ε уменьшается по мере работы алгоритма. Снижение ε приводит к тому, что система все реже выбирает случайные действия и все чаще использует накопленный опыт.

Блок 12

Агент будет продолжать обучение, выбирая действия и обновляя таблицу $Q(s, a)$, пока не достигнет определенной сходимости, то есть пока изменения в таблице не станут минимальными или не достигнет предела заданных эпизодов. Сходимость означает, что агент нашел оптимальные периоды синхронизации для всех состояний ИР, обеспечивая их актуальность $R_{акт} \geq R_{акт}^{доп}$.

Графическое представление обучения при использовании ε жадной стратегии представлено на рисунке 7.

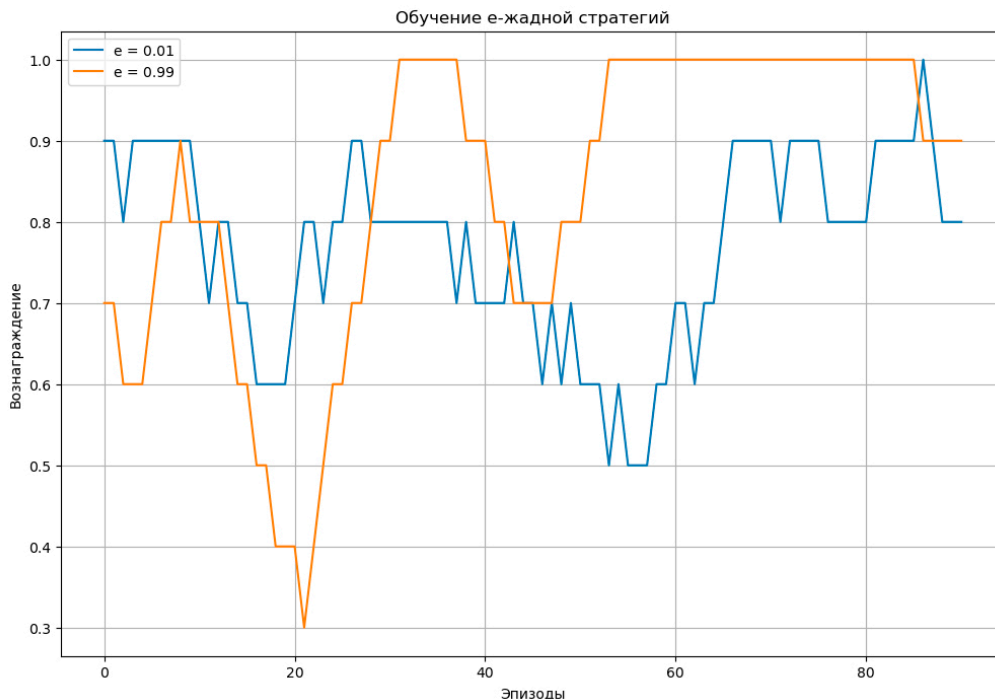


Рис. 5. Обучение по эпизодам с использованием ε жадной стратегии.

Для алгоритм выбора действия агента на основе стратегии Больцмана использует вероятность выбора действия, зависящую от значений

$Q(s,a)$. Это позволяет агенту исследовать среду, отдавая предпочтение действиям с высокими Q -значениями, но не исключая менее вероятные действия. Общий алгоритм обучения с подкреплением на основе Общ. алгоритм обучения с подкреплением на основе стратегии Больцмана представлен на рисунке 6.

Блок 1-3.

Ввод исходных данных для обучения. Дополнительно необходимо установить коэффициент температуры $\tau > 0$, который управляет степенью случайности выбора действий. Это необходимо для обеспечения баланса между исследованием и эксплуатацией.

Блок 4.

Организация цикла обучения для каждого эпизода, выходом из цикла является завершение обучения.

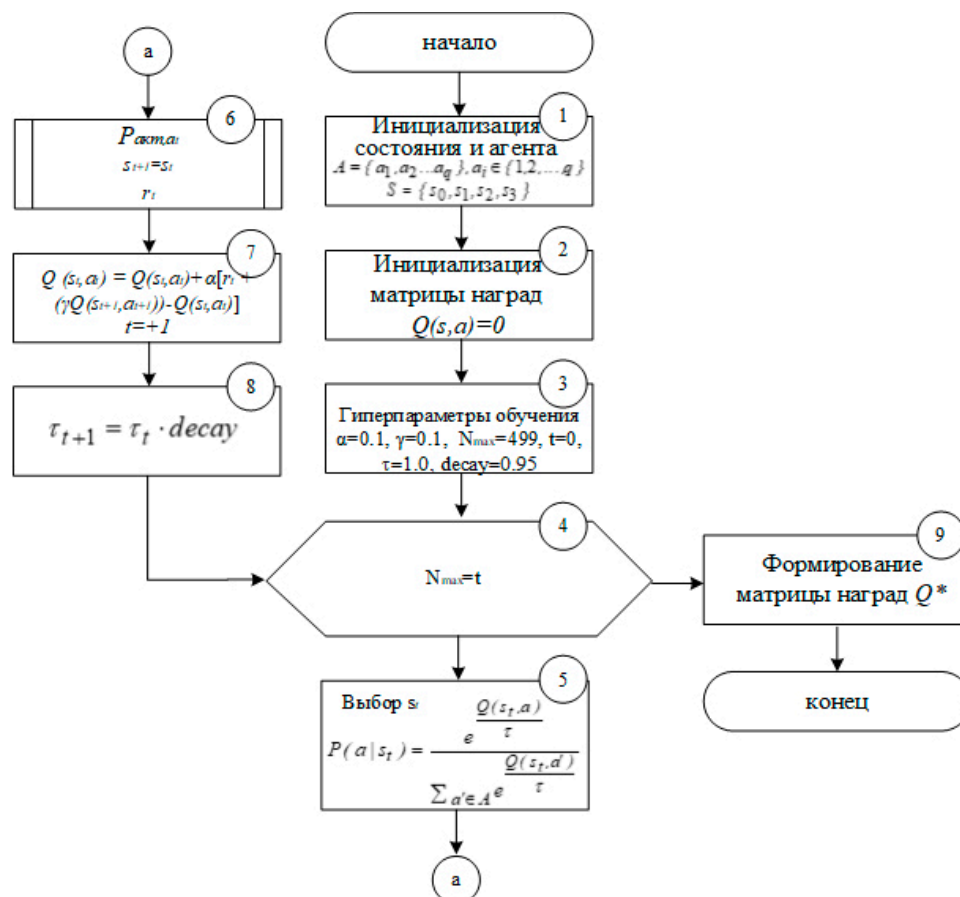


Рис. 6. Обучение по эпизодам с использованием стратегии Больцмана.

Блок 5.

Для каждого возможного действия $a \in A$ в текущем состоянии s_t вычисляется вероятность выбора $P(a|s_t)$. Эта выражение позволяет осуществлять действия с высокими значениями $Q(s,a)$ более вероятными, но сохраняет шанс на выбор действий с низкими значениями, особенно при высоком τ . Это способствует исследованию среды. Например, при:

$$\tau=5:x:[1;2] \rightarrow p(x):[0,45;0,55];$$

$$\begin{aligned}\tau &= 2:x:[1;2] \rightarrow p(x):[0,38;0,62]; \\ \tau &= 0.5:x:[1;2] \rightarrow p(x):[0,12;0,88]; \\ \tau &= 0.1:x:[1;2] \rightarrow p(x):[0,00;1,00];\end{aligned}$$

Чем меньше значение τ , то действия агента более жадные.

Блок 6.

После того как агент выбирает действие a_t (период синхронизации), система получает вероятность нахождения ИР в актуальном состоянии $P_{акт}$ [6]. Оценка эффективности действия производится через функцию вознаграждения r_t , которая зависит от того, как изменился уровень актуальности ИР после применения выбранного действия a_t .

Вознаграждение рассчитывается на основе состояния актуальности ИР до и после синхронизации, что выражено через функцию вознаграждения $r_t = R(s_t, a_t, s_{t+1})$. Если синхронизация улучшила актуальность ИР т.е. $P_{акт} \geq P_{акт}^{доп}$, агент получает положительное вознаграждение, если ухудшила – отрицательное.

Блок 7.

Обновление Q -значений, соответствуют блоку 10 алгоритма оптимизации периода синхронизации ИР на основе ε -жадной стратегии.

Блок 8.

После обновления Q -значений значение τ может быть уменьшено для того, чтобы с течением времени стратегия смещалась от исследования к использованию. Будем уменьшать, τ экспоненциально:

$$\tau \leftarrow \tau \cdot \text{decay},$$

где $\text{decay} < 1$.

Снижение τ уменьшает вероятность выбора менее выгодных действий, что позволяет агенту сосредотачиваться на более оптимальных стратегиях.

Блок 9

Агент будет продолжать обучение, выбирая действия и обновляя таблицу $Q(s, a)$, пока не достигнет определенной сходимости, то есть пока изменения в таблице не станут минимальными или не достигнет предела заданных эпизодов. Сходимость означает, что агент нашел оптимальные периоды синхронизации для всех состояний ИР, обеспечивая их актуальность $P_{акт} \geq P_{акт}^{доп}$.

Графическое представление обучения при использовании ε жадной стратегии представлено на рисунке 7.

Для оценки эффективности разработанной методики и наглядного представления ее этапов разработана в программной среде AnyLogic имитационная модель функционирования ПУ в АС СН, структура которой представлена на рисунке 8 [7].

В результате выполнения второго этапа разработанной методики, связанного с выбором варианта действия агента и обучением с подкреплением, сформировано множество решений по определению оптимальных периодов синхронизации ИР, хранящихся в базах данных. В соответствии

с алгоритмом работы третьего этапа методики проведена организация хранения данных Q -матрицы, отражающей функции полезности для различных состояний и действий. Это позволило построить имитационную модель функционирования системы синхронизации баз данных, учитывающую изменения актуальности ИР в зависимости от выбранных периодов обновления [8]

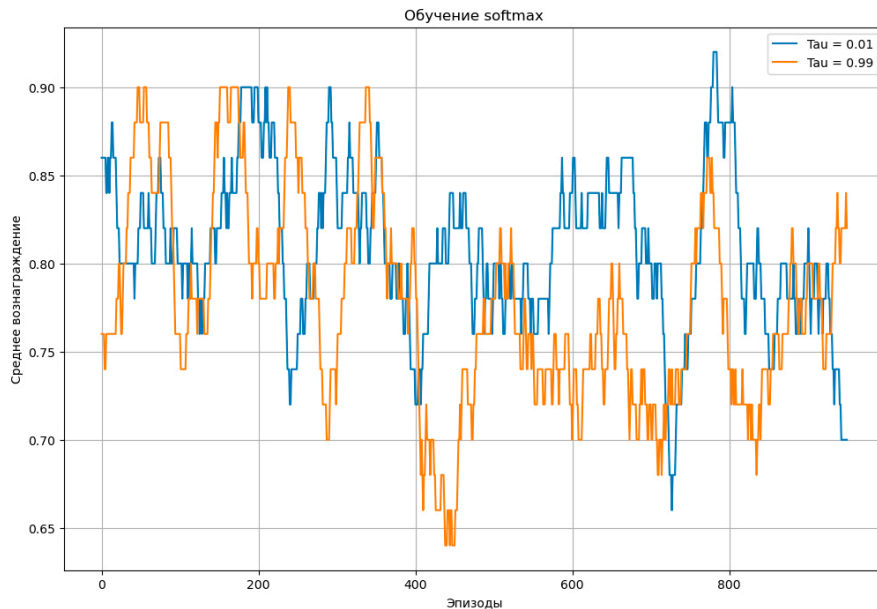


Рис. 7. Обучение по эпизодам с использованием стратегии Больцмана.

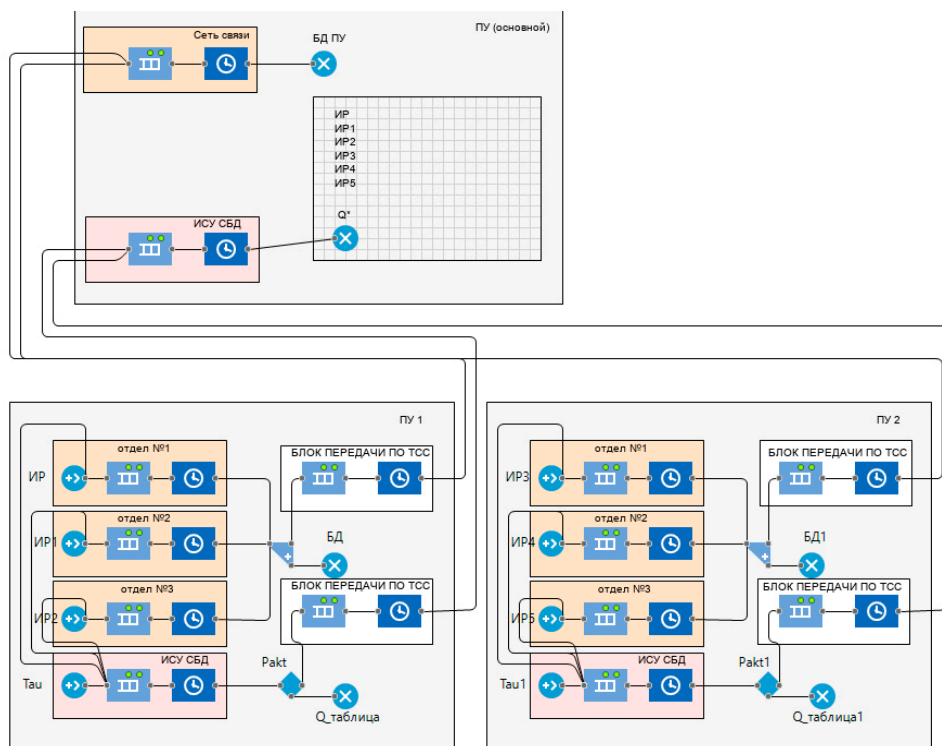


Рис. 8. Структура имитационной модели пункта управления автоматизированной системы специального назначения в программной среде AnyLogic

Проведём оценку эффективности методики на примере проведения учений «Север» 1-му мотострелковому батальону была поставлена задача по развертыванию обороны на ключевых позициях. Учения длились 7 суток. В процессе выполнения задачи на ПУ батальона поступали донесения о состоянии различных систем связи. В первый день учений из-за неблагоприятных погодных условий было выведено из строя 80 единиц оборудования связи. На рисунке 9 красным цветом показана вероятность актуальности информации о состоянии систем связи в ПУ батальона.

Отчёты о повреждении оборудования были занесены в базу данных в течение двух часов, но их синхронизация с вышестоящими ПУ произошла лишь через 24 часа, согласно установленному графику обновлений. На четвертый день, во время интенсивных маневров, произошло существенное изменение в состоянии оборудования связи, однако эти данные были зафиксированы на ПУ только через 24 часа из-за установленного регламента. Применение методики позволило своевременно выявлять устаревшую информацию и проводить синхронизацию, что показано зелёным цветом.

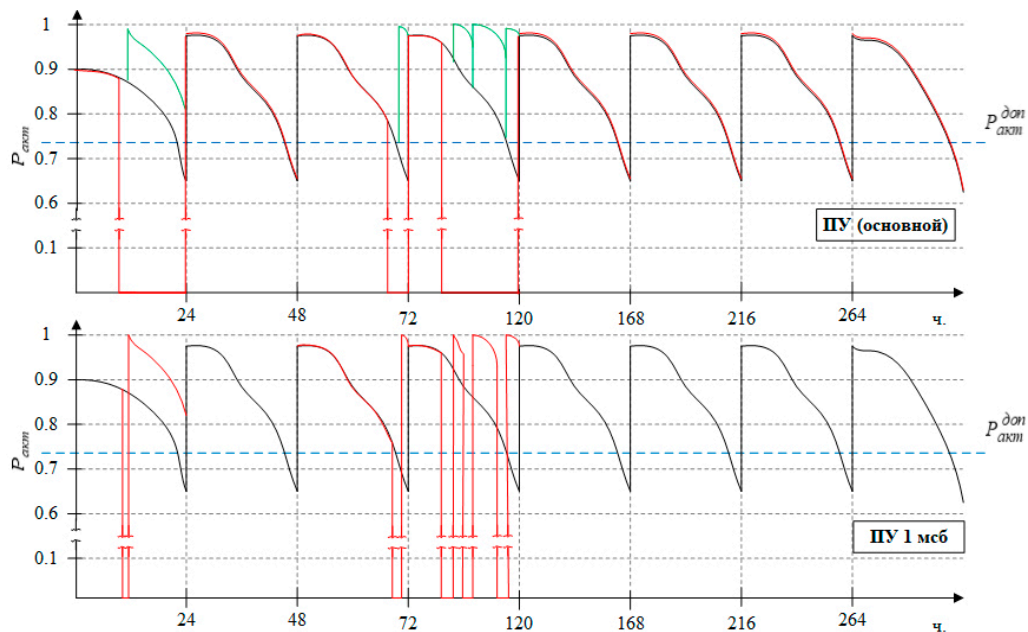


Рис. 9. Контрольный пример применения методики

В результате применения алгоритма обновления Q -значений на основе функции Беллмана были выявлены оптимальные параметры периодов синхронизации для обеспечения требуемой степени актуальности данных. Графическое представление зависимости своевременности синхронизации БД от выбранных периодов обновления ИР представлено на рисунке 10.

Для оценки эффективности применения разработанной методики предлагается применить следующий математический аппарат [9]:

$$E_{me} = \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) \times 100\%, \quad (13)$$

$P_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{св,i} \Theta(P_{акт,i} \geq P_{акт}^{доп})$, P_1 – вероятность своевременной синхронизации БД без использованием разработанной методики, N – количество ИР, $P_{акт,i}$ – вероятность актуальности i -го ИР с регламентными периодами синхронизации, $P_{акт}^{доп}$ – допустимый уровень актуальности ИР,

$\Theta(P_{акт,i} \geq P_{акт}^{доп}) = \begin{cases} 1, \text{ если } P_{акт,i} \geq P_{акт}^{доп}, \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$ – индикаторная функция;

$P_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{св,i} \Theta(P_{акт,i} \geq P_{акт}^{доп})$, P_2 – вероятность своевременной синхронизации БД с использованием разработанной методики, N – количество ИР, $P_{акт,i}$ – вероятность актуальности i -го ИР с оптимальными периодами синхронизации, $P_{акт}^{доп}$ – допустимый уровень актуальности ИР,

$\Theta(P_{акт,i} \geq P_{акт}^{доп}) = \begin{cases} 1, \text{ если } P_{акт,i} \geq P_{акт}^{доп}, \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$ – индикаторная функция; $E_{те}$

– показатель эффективности использования разработанной методики.

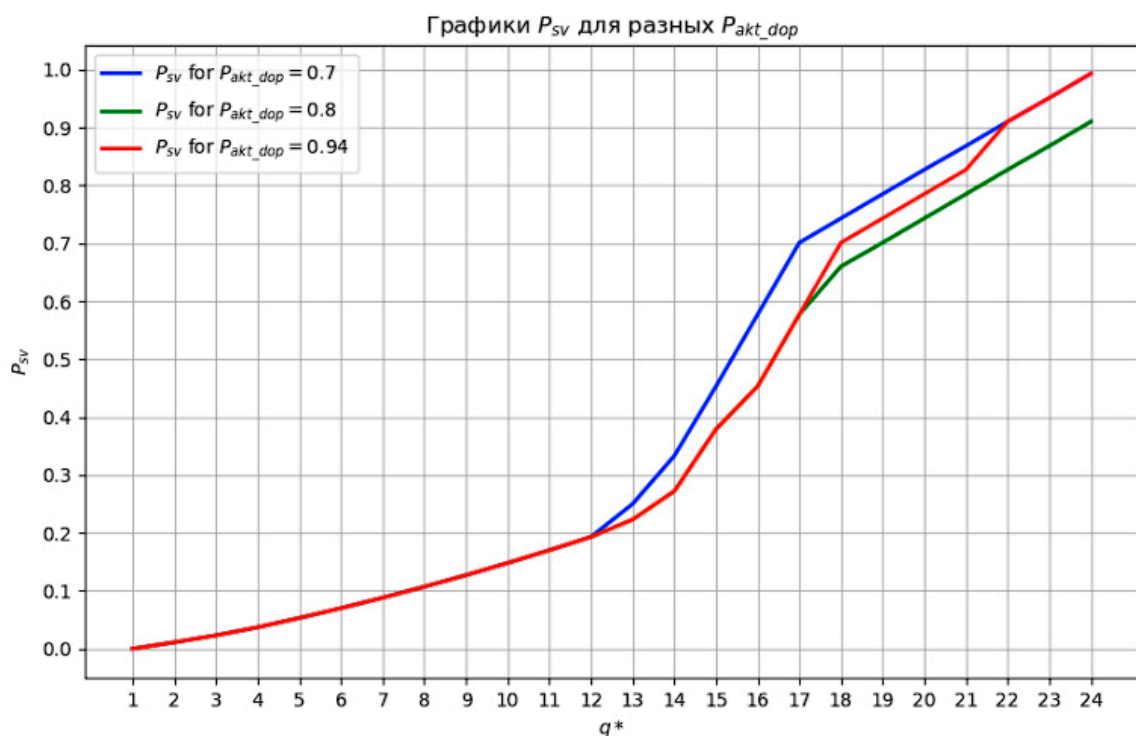


Рис. 10. Зависимость своевременности синхронизации баз данных от выбранных периодов обновления информационных ресурсов

Результаты оценки эффективности применения разработанной методики представлены в таблице.

Оценка эффективности разработанной методики

Требование $P_{\text{доп}}^{\text{акт}}$	Количество ИР i	Значение без использования методики P_1	Значение с использованием методики P_2	$E_{\text{те}}, \%$
0,7	15	0,73	0,80	10
0,8	15	0,60	0,73	22
0,94	15	0,20	0,80	30

В результате проведенного исследования предложена методика повышения своевременности синхронизации баз данных для автоматизированных систем специального назначения. Методика базируется на использовании обучения с подкреплением для оптимизации периодов синхронизации и включает четыре основных этапа. Практическая апробация методики показала её эффективность в улучшении актуальности данных и минимизации временных задержек. Использование данной методики позволяет значительно повысить оперативность и точность принятия управленческих решений за счёт своевременного обновления информационных ресурсов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение функционала методики и её адаптацию к различным типам автоматизированных систем.

Список литературы

1. Удальцов А.В. Синхронизация баз данных в системах военного управления / А.В. Удальцов, Д.Д. Корякин, И.Б. Саенко // Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей связи специального назначения: Сборник материалов научно-практической конференции, Санкт-Петербург. 2023. С. 81-87.
2. Анфилов В.С. Теоретические основы автоматизации управления войсками и связью. Часть 1. Системные основы автоматизации управления войсками и связью: учебное пособие / В.С. Анфилов, В.С. Авраменко, О.И. Пантюхин. СПб.: ВАС, 2014. 312 с.
3. Гончаров А.А. Метод восстановления модели процессов во встроенных системах по журналу событий / А.А. Гончаров, С.В. Быковский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3(67). С. 5-17.
4. Саттон Р.С., Барто Э. Дж. Обучение с подкреплением: Введение. 2-е изд./пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 220. 552 с.
5. Грессер Л., Кенг В.Л. Глубокое обучение с подкреплением: теория и практика на языке Python. СПб.: Питер, 2022. 416 с.
6. Удальцов А.В. Модель оценивания актуальности информации в базах данных автоматизированных систем специального назначения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 12. С. 140-145.
7. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.

8. Бирюков М.А Имитационный подход к моделированию системы разграничения доступа к единому информационному пространству / М.А. Бирюков, А.А. Брунилин, И.Б. Саенко // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей: в 4-х томах. 2017. С. 78-83

9. Саенко И.Б. Анализ проблемы синхронизации локальных баз данных в распределенной информационной системе / И.Б. Саенко, А.В. Ермаков, А.В. Удальцов // Труды научно-исследовательского института радио. Санкт-Петербург. 2022. С. 37-41.

Удальцов Александр Владимирович, адъюнкт, axil2003@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного

METHODS FOR IMPROVING TIMELINESS SYNCHRONIZATION OF AUTOMATED DATABASES SPECIAL PURPOSE SYSTEMS BASED ON MACHINE LEARNING

A.V. Udaltsov

The article discusses a technique for improving the timeliness of database synchronization in automated special-purpose systems. The methodology includes monitoring the relevance of information resources and using reinforcement learning to optimize synchronization periods. The proposed algorithms and methods can significantly improve the timeliness of data synchronization between control points, which minimizes the risks of making incorrect management decisions. The effectiveness of the technique is confirmed by the example of a simulation model.

Key words: database synchronization, information relevance, decision support system, information resources, simulation modeling, AnyLogic.

Udaltsov Alexander Vladimirovich, adjunct, axil2003@yandex.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОСТРЕССОМ СОТРУДНИКОВ БИБЛИОТЕК В ЭПОХУ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Е.В. Шевчук, М.С. Афонасьев

В статье исследуется феномен техностресса, актуализировавшийся в период цифровой трансформации общества. В работе проанализированы существующие методы оценки уровня техностресса, его признаки и последствия, охватывающие широкий спектр физиологических, психологических и поведенческих расстройств. Разработана система управления технострессом, адаптированная технология оценки уровня техностресса с учетом специфики деятельности сотрудников современных библиотек. Представленный в статье подход к организации системы управления технострессом в библиотеке может быть адаптирован для библиотек различного типа с учетом их специфики. Сделан вывод о необходимости проведения дальнейших исследований проблем техностресса с учетом реалий современного цифрового общества.

Ключевые слова: библиотечные процессы, качество управления бизнес-процессами, техностресс, цифровая трансформация.

Цифровая трансформация определена как одна из национальных целей развития Российской Федерации. Указом Президента РФ от 07.05.2024 N 309 "О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года" в качестве одного из целевых показателей национальной цели «Цифровая трансформация государственного и муниципального управления, экономики и социальной сферы» обозначено достижение в 2030 году «цифровой зрелости» сферы образования, предполагающее в том числе развитие цифровых сервисов и технологий обработки больших объемов данных [1].

Современные методисты и педагоги отмечают, что в эпоху цифровой трансформации образования еще более усугубилась проблема эпохи информатизации, выражающаяся в том, что студенты, как представители наиболее подрессированного кластера общества, в процессе обучения зачастую предпочитают обращаться к непроверенным, но легкодоступным источникам информации из интернета, нежели к использованию бумажного или цифрового библиотечного фонда [2-7]. Данная проблема влияет на проблему обеспечения качества образования в целом.

В связи с этим библиотеки, особенно библиотеки образовательных учреждений, в эпоху цифровой трансформации должны быть флагманами инноваций, т.к. их целевая аудитория – студенты, магистранты, аспиранты, научно-педагогические работники, хорошо владеющие и привыкшие широко использовать весь арсенал доступных современных технологий, быстро восприимчивые к появляющимся новым технологиям [5-9].

Современные библиотеки активно внедряют, обновляют и используют цифровые технологии и системы. Наиболее распространенными библиотечными системами являются: 1С: Библиотека (<http://1c.ru>), АБИС

«Руслан»(<http://www.ruslan.ru>), ИРБИС(<http://www.aonb.ru/irbis>), Liber Media (<http://www.libermedia.ru>), АИБИС «МАРК-SQL» (<http://www.informsystema.ru>) и другие. Кроме того, в последнее время библиотеки стали активно использовать различные цифровые сервисы для продвижения имиджа [6-8].

Библиотеки становятся все более интегрированными в современные технологические процессы и цифровое пространство. Однако динамичный рост и развитие технологий отразился на библиотеках не только в положительном ключе. Технические инновации в библиотечном деле привели к возникновению новых задач для специалистов, работающих в этой сфере. Библиотекарям теперь необходимо непрерывно осваивать не только новые интегрированные библиотечные системы, но и постоянно обновляющиеся цифровые технологии и сервисы.

Непрерывно обновляется и круг обязанностей сотрудников библиотек. Теперь в обязанности сотрудников библиотек не только работы с библиотечными системами, но и управление цифровыми ресурсами и сервисами, работа с институциональными репозиториями, администрирование баз данных и другое [6-9].

На фоне этих изменений становится очевидным, что для успешного выполнения своих функций библиотекарям нужно непрерывно получать новые знания и формировать новые компетенции, чтобы адаптироваться к процессам цифровизации общества.

Таким образом, в настоящее время для библиотек актуализировались проблемы, связанные с «ростом техностресса» [10-13], излучающиеся учеными уже на протяжении нескольких лет (рисунок 1).

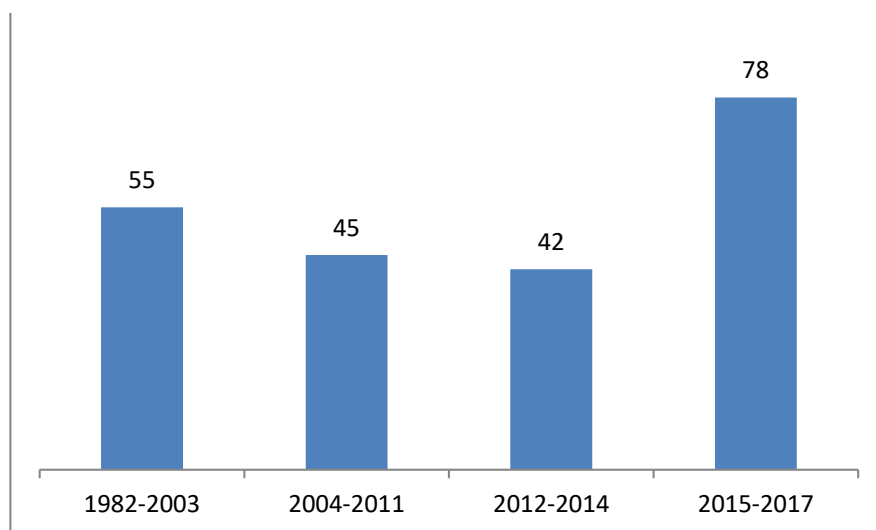


Рис. 1. Количество научной продукции на тему «техностресс» (по данным Scopus за период 1982-2017 гг.)

Техностресс - это сравнительно недавно возникший синдром [10-13]. Термин «техностресс» появился в 1984 году. Технологический стресс был представлен общественности доктором Крейгом Бродом, специалистом в области клинической психологии из США. Этот термин описывает

состояние, которое можно охарактеризовать как расстройство или заболевание, возникающее из-за трудностей, связанных с быстрым адаптированием к компьютерным технологиям. Неспособность справляться с такими технологиями проявляется в двух связанных аспектах: во-первых, это не сопряженность с новыми компьютерными средствами, во-вторых, наличие чрезмерной идентификации с этими технологиями.

Признаки и проявления техностресса охватывают широкий спектр физиологических, психологических и поведенческих расстройств. Эти изменения обычно воспринимаются как часть человеческой сущности. Они могут проявляться в виде физического и эмоционального выгорания, сопровождающегося низкой самооценкой и пессимистичным мировосприятием. К тому же, у людей наблюдается снижение интереса и эмоциональной привязанности к окружающим, особенно к тем, кого они воспринимают как источники стресса [12].

Техническая перегрузка, техническая сложность, техническая незащищенность и техническая неопределенность, часть из этих проблем, с которыми сталкивается современный библиотекарь, а это впоследствии приводит к технострессу и профессиональному выгоранию, вызванному современными технологиями.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей статьи является разработка системы управления технострессом в современных библиотеках.



Рис. 2. Обобщенная схема системы управления технострессом

Исходя из личного опыта и анализа опыта проектирования систем управления, авторы пришли к выводу, что для обеспечения качества управления любым процессом необходимо придерживаться принципов [6,14]: обеспечения востребованности и контроля процессов, системной взаимосвязи процессов, ответственности за процессы. Для возможности непрерывного совершенствования процессов необходимо предусмотреть инструменты мониторинга и обратной связи, в том числе генерации цифровых отчетов для поддержки принятия решений. Также необходимо четко формализовать индикаторы процесса, кластеры участников процесса и

степень ответственности каждого кластера, сформировать систему распределения прав доступа к цифровым ресурсам и сервисам системы поддержки принятия решений. Необходимы мероприятия по стандартизации процессов, отраженные в локальных нормативных актах и/или документах системы менеджмента качества.

В общем случае систему управления технострессом можно представить как индикативную систему управления с обратной связью (рис. 2).

На основании системного анализа отечественных и зарубежных источников [10-13] авторы настоящей статьи предлагают в процессе управления учитывать пять основных типов состояний, связанных с технострессом, с которыми сотрудники библиотек могут столкнуться: техно-перегрузка, техно-вторжение, техно-сложность, техно-ненадежность и техно-неопределенность.

Техно-перегрузка проявляется в том, что сотрудники библиотек вынуждены увеличивать темп работы и адаптировать свои привычные методы. Им необходимо выполнять больше задач за меньшее время, что вызывает у них стресс и беспокойство из-за стремительного развития технологий и цифровизации.

Техно-вторжение заключается в том, что специалисты становятся доступными в любое время и в любом месте, что порождает необходимость постоянного поддержания связи. Такая постоянная доступность приводит к ощущению зависимости от технологий и вмешательства в личное пространство и время.

Техно-сложность возникает, когда сложные информационные и/или цифровые системы и сервисы требуют от специалистов значительных усилий для их освоения и обновления навыков, и разнообразие появляющегося нового функционала усугубляет эту проблему, вызывая стресс.

Техно-незащищенность - это страх потерять рабочие места в пользу более компетентных пользователей, что может приводить к чувству неуверенности и добавлять дополнительное напряжение.

Техно-неопределенность – постоянные изменения и обновления мешают библиотекарям привыкнуть к работе с системами и сервисами, заставляя переучиваться и адаптироваться снова и снова.

Для организации обратной связи системы управления, в частности, оценки уровня техностресса, необходим эффективный инструмент оценки техностресса; анкета, структурированная в соответствии с выделенными вышеперечисленными состояниями.

По результатам анализа литературы был сделан вывод, что данный вопрос исследовался, в основном, зарубежными учеными. Наиболее популярной, или «базовой», считается анкета, предложенная в научной статье [15] (рисунок 3).

По мнению исследователей [16-17], анкета хорошо структурирована, охватывает различные аспекты техностресса, надежность и валидность

анкеты подтверждены соответствующими исследованиями, алгоритм оценки и цифровая оценочная шкала анкеты позволяет формализовать процесс анкетирования для его автоматизации.

В рамках проводимых исследований для создания системы управления технострессом в библиотеках России анкета была адаптирована (рис. 4).

Per favore, indica con quale frequenza solitamente ti capita di provare ciascuna delle sensazioni descritte mentre lavori.

1. L'utilizzo prolungato e/o simultaneo di più apparecchi tecnologici per lavorare riduce il mio livello di concentrazione e mi fa distrarre più facilmente
Mai Qualche volta Spesso Sempre
2. L'utilizzo prolungato e/o simultaneo di più apparecchi tecnologici per lavorare influisce negativamente sul mio rendimento al lavoro
Mai Qualche volta Spesso Sempre
3. L'uso continuativo e/o simultaneo di più apparecchi tecnologici per lavorare influisce negativamente sulla mia qualità di vita lavorativa
Mai Qualche volta Spesso Sempre

Рис. 3. Фрагмент «базовой» анкеты оценки уровня техностресса

Когнитивная перегрузка

5. В связи с внедрением новых цифровых систем и/или технологий у меня создается впечатление повышения рабочей нагрузки

Никогда Иногда Часто Всегда

6. Чтобы идти в ногу с новыми технологиями и/или их постоянными обновлениями, у меня возникает ощущение, что приходится жертвовать личное время для выполнения своих должностных обязанностей

Никогда Иногда Часто Всегда

Рис. 4. Фрагмент адаптированной анкеты оценки уровня техностресса в библиотеке

По мнению ученых [10-13, 15-17], в общем случае (с учетом средней скорости обновления технологий) оптимальная периодичность анкетирования сотрудников – один раз в квартал, однако в конкретных случаях при определении периодичности анкетирования стоит учитывать динамику обновления или внедрения новых технологий и систем.

Алгоритм минимизации техностресса в библиотеке представлен на рисунке 5.

В рамках проектирования базы знаний системы управления технострессом необходимо сформировать систему корректирующих (по результатам обратной связи) управляющих воздействий.

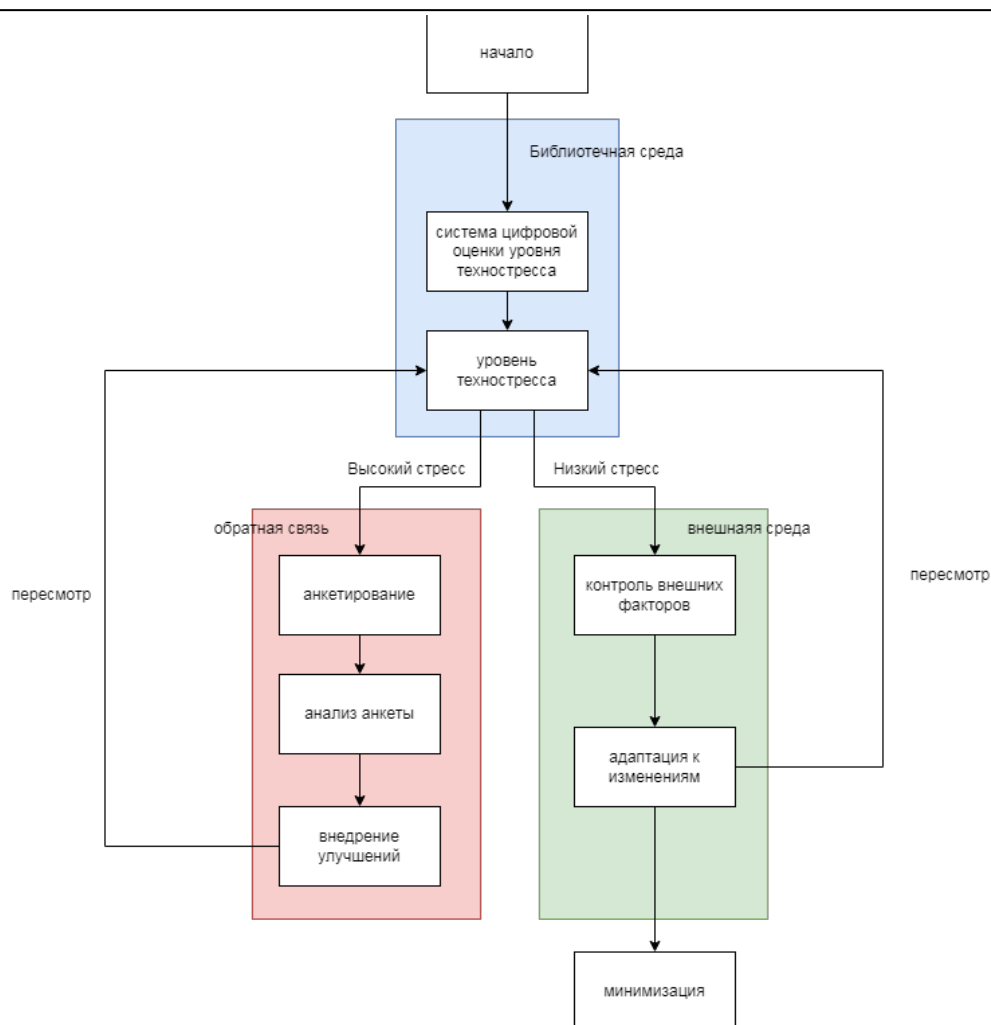


Рис. 5. Алгоритм минимизации уровня техностресса в библиотеке

Исходя из анализа литературы, по мнению авторов настоящей статьи, система должна включать в себя следующие элементы [6, 10-13, 15-17]:

образовательная стратегия (проведение регулярных тренингов и семинаров, разработка инструкций по использованию цифровых инструментов и т.п. в целях облегчения процесса адаптации к изменениям);

стратегия оптимизации бизнес- процессов библиотеки (автоматизация рутинных задач, выбор интуитивно понятных платформ и систем, создание рабочего графика в котором осуществляется регуляция времени в цифровом пространстве и т.п. в целях снижения когнитивной нагрузки и вероятности переутомления и выгорания);

стратегия комфортной рабочей среды (эргономичное оборудование рабочих мест, зон отдыха и т.п. в целях снижения уровня физического и эмоционального напряжения);

стратегия личностного развития сотрудников (обучение навыкам самоорганизации и тайм-менеджмента, развитие устойчивого отношения к переменам через осознание их важности и т.п. в целях преодоления сопротивления вводимым инновациям).

По результатам представленного в настоящей статье исследования авторами сделан ряд выводов.

Техностресс, возникающий из-за быстрого прогресса технологий, представляет собой значительную проблему для сотрудников современных библиотек. В эпоху цифровизации, когда библиотеки все активнее внедряют инновационные технологии, библиотекари сталкиваются с избытком информации и цифровых данных, необходимостью постоянного обновления профессиональных и цифровых навыков, а также с физическими и психологическими последствиями от работы новыми технологиями и цифровыми системами.

Периодичный мониторинг уровня техностресса сотрудников библиотек должен быть нацелен на выявление степени подверженности технострессу, определение причин и прогнозирования последствий техностресса, с целью обеспечения возможности управления технострессом в библиотечном контексте, в том числе своевременного внедрения профилактических мер.

Представленный в статье подход к организации системы управления технострессом в библиотеке, по мнению авторов, может быть адаптирован для библиотек различного типа с учетом их специфики. Предложенные элементы системы управления могут быть использованы для контроля и управления уровнем техностресса в библиотеках, минимизации уровня техностресса и повышения общей эффективности деятельности библиотек.

Для более детального анализа проблем, связанных с технострессом, необходимо проводить дополнительные исследования, направленные на оценку эффективности различных методов профилактики техностресса, а также на разработку методов оптимизации библиотечных процессов с учетом технологических трендов. Актуальность и недостаточная проработанность данного вопроса в библиотечной среде очевидна, и дальнейшие исследования в этой области важны для создания комфортных и продуктивных условий труда библиотекарей в современном цифровом обществе.

Список литературы

1. Российская Федерация. Президент. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 N 309. // Техэксперт. [Электронный ресурс] URL: <http://metrolog.kodeks.ru/docs08> (дата обращения: 14.01.2025).

2. Проскуряков Н.Е. Перспективы развития электронных изданий в образовании / Н.Е. Проскуряков, Б.С. Яковлев, Н.Н. Архангельская // Информация: передача, обработка, восприятие: Материалы международной научно-практической конференции, Екатеринбург / Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; Редакционная коллегия: Д. А. Тарасов, А. Г. Тягунов (главный научный редактор), А. П. Сергеев (научный редактор), К. А. Аксенов, И. В. Троицкий, Г. Л. Левонян, Ж.

Ибраева. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. С. 103-114. EDN ZCWTDX.

4. Яковлев Б.С. Перспективы развития и проблемы искусственного интеллекта в сферах генерации контента, взаимодействия с человеком и авторским правом / Б.С. Яковлев, М.Ю. Шамрин, Х.А. Хасан // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 184-190. DOI 10.24412/2071-6168-2023-9-184-185. EDN KDEBUG.

5. Пляхотко А.С. Библиотека нового типа как региональный центр новых знаний и цифровой культуры // Сервис plus. 2021. Т. 15, № 3. С. 104-110.

6. Григоренко О.В. Интеграция информационного пространства научно-технической библиотеки и корпоративной информационной системы вуза / О. В. Григоренко, Е. В. Шевчук, А. В. Шпак // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 260-266. DOI 10.24412/2071-6168-2024-4-260-261. EDN GABRDP.

7. Корнева О.С. Обзор электронно-библиотечных систем для высших учебных заведений // Научный форум: Инновационная наука : сборник статей по материалам XXIII международной научно-практической конференции, Москва, 27 мая 2019 года. Том 5 (23). Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Международный центр науки и образования", 2019. С. 20-25. EDN VQGLKJ.

8. Asadi S., Abdullah R., Yah Y., Nazir S. Understanding Institutional Repository in Higher Learning Institutions: A Systematic Literature Review and Directions for Future Research // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 35242-35263. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2897729.

9. The Influence of Technostress on Library: A Survey of the University for Development Studies Libraries // ResearchGate [Электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/325654692_The_influence_of_Technostress_on_LibraryA_survey_of_the_University_For_Development_studies_Libraries (дата обращения: 20.01.2025).

10. Cristian Salazar-Concha a, Pilar Ficapal-Cusí b, Joan Boada-Grau c , Luis J. Camacho Analyzing the evolution of technostress: A science mapping approach / Cristian Salazar-Concha a, Pilar Ficapal-Cusí b, Joan Boada-Grau c , Luis J. Camacho // Heliyon [Электронный ресурс] URL: <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/136908/1/Analyzing%20the%20evolution%20of%20technostress.%20A%20science%20mapping%20approach.pdf> (дата обращения: 20.01.2025).

11. Technostress: a content analysis. [Электронный ресурс] URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED423911.pdf> (дата обращения: 20.01.2025).

12. Technostress: trends and challenges in the 21st century knowledge management // European Scientific Journal (European Scientific Institute) [Электронный ресурс] URL: <https://core.ac.uk/reader/328024750> (дата обращения: 20.01.2025).

13. Коновалова Валерия Германовна Цифровые технологии как фактор техностресса: проблемы и возможности их решения // УПИРР.

2022. №3. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-tehnologii-kak-faktor-tehnostressa-problemy-i-vozmozhnosti-ih-resheniya> (дата обращения: 20.01.2025).
14. Репин В.В., Елиферов В.Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес – процессов. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013.
15. Porcari DE, Ricciardi E, Orfei MD. A new scale to assess technostress levels in an Italian banking context: the Work-Related Technostress Questionnaire. *Front Psychol.* 2023 Sep 1;14:1253960. DOI: 10.3389/fpsyg.2023.1253960. PMID: 37724293; PMCID: PMC10505406. [Электронный ресурс] URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10505406> (дата обращения: 20.01.2025).
16. Ragu-Nathan T., Tarafdar Monideepa, Nathan Ragu, Tu Qiang. (2008). The Consequences of Technostress for End Users in Organizations: Conceptual Development and Empirical Validation. *Information Systems Research.* 19. 417-433. [Электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/profile/Qiang-Tu-/publication/220079808_The_Consequences_of_Technostress_for_End_Users_in_Organizations_Conceptual_Development_and_Empirical_Validation/links/0a85e53469f0c6875c000000/The-Consequences-of-Technostress-for-End-Users-in-Organizations-Conceptual-Development-and-Empirical-Validation.pdf (дата обращения: 20.01.2025).
17. Nina Urukovičová, Eva Rošková, Milica Schraggeová, Jozef Smoroň, Psychometric properties of the Technostress Creators Inventory among employed Slovak respondents, *Computers in Human Behavior Reports*, Volume 12, 2023, 100324. [Электронный ресурс] URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245195882300057X> (дата обращения: 20.01.2025).

Шевчук Елена Владимировна, канд. техн. наук, доцент, evshevch@mail.ru, Россия, Новосибирск, Новосибирский государственный педагогический университет,

Афонасьев Михаил Сергеевич, сотрудник, m.afonasev@internet.ru, Россия, Новосибирск, Новосибирский государственный педагогический университет

TECHNOSTRESS MANAGEMENT SYSTEM FOR LIBRARY STAFF IN THE ERA OF DIGITAL TRANSFORMATION

E.V. Shevchuk, M.S. Afonasev

The article examines the phenomenon of technostress, which has become relevant during the digital transformation of society. The work analyzes existing methods for assessing the level of technostress, signs and consequences of technostress, covering a wide range of physiological, psychological and behavioral disorders. A technostress management system, an adapted technology for assessing the level of technostress, taking into account the specifics of the activities of employees of modern libraries, have been developed. The approach to organizing a technostress management system in a library presented in the article can be adapted for libraries of various types, taking into account their specifics. A conclusion is made about the need for further research into technostress problems, taking into account the realities of a modern digital society.

Key words: library processes, quality of business process management, technostress, digital transformation.

Shevchuk Elena Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, evshevch@mail.ru, Russia, Novosibirsk, Novosibirsk state pedagogical university,

Afonasev Mikhail Sergeyevich, employee, m.afonasev@internet.ru, Russia, Novosibirsk, Novosibirsk state pedagogical university

УДК 004.891.3

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-160-161

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ПО СЕРВЕРНЫМ СТАНЦИЯМ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

О.В. Денисов

В статье рассматриваются вопросы распределения нагрузки между вычислительными ресурсами серверного комплекса. Исследованы возможности повышения быстродействия и производительности высоконагруженных клиент-серверных информационных систем путем оптимизации распределения вычислительной нагрузки с использованием генетического алгоритма.

Ключевые слова: распределение вычислительной нагрузки, серверный комплекс, генетический алгоритм оптимизации, имитационная модель.

Введение. Современные серверные комплексы, обслуживающие облачные и сетевые ресурсы, должны обрабатывать большой объем вычислительных задач. Поэтому необходимо предусмотреть возможность распределения нагрузки между серверами таким образом, чтобы загружать их равномерно и, как следствие этого, увеличить скорость обработки данных пользователей [1-5]. Важным при разработке алгоритмов работы сервера-балансира, выполняющего функцию распределения нагрузки по серверам, является обеспечение оптимального функционирования системы по выбранному показателю качества.

Развитие новых информационных технологий, таких как, например, генетические алгоритмы (ГА), являющиеся алгоритмами прямого поиска, делает возможным эффективно решать задачу оптимизации распределения вычислительной нагрузки. Математический аппарат генетических алгоритмов [6, 7] позволяет выполнить оптимизацию в случаях, если показатель качества работы системы является нелинейной, не дифференцируемой функцией.

В работе представлены результаты исследования возможности решения задачи оптимизации времени обработки запросов пользователей на основе критерия, учитывающего количество обработанных заявок.

Постановка задачи. В качестве исходных данных для проведения исследований использованы экспериментально полученные параметры серверного комплекса, обрабатывающего вычислительные задачи [2]. При этом рассматривались серверы с различными вычислительными возможностями и состояниями загрузки. Принималось, что распределение нагрузки между вычислительными ресурсами осуществляется по круговому циклу с использованием алгоритма упорядочивания и перебора серверов Round-robin [3].

Задача оптимизации распределения нагрузки по вычислительным ресурсам ставилась следующим образом: определить параметры серверного комплекса (среднее время обслуживания заявки для каждого сервера), при которых будет обработано наибольшее количество запросов пользователей, поступивших в систему.

Имитационная модель работы серверного комплекса. Для проведения исследований разработана имитационная модель серверного комплекса с использованием программных средств MATLAB / Simulink / SimEvents [2, 8-10]. Модель учитывает особенности поступления заявок, их обработки и распределения по серверам. Схема имитационной модели работы серверного комплекса при распределении нагрузки с помощью сервера-балансера приведена на рис. 1.

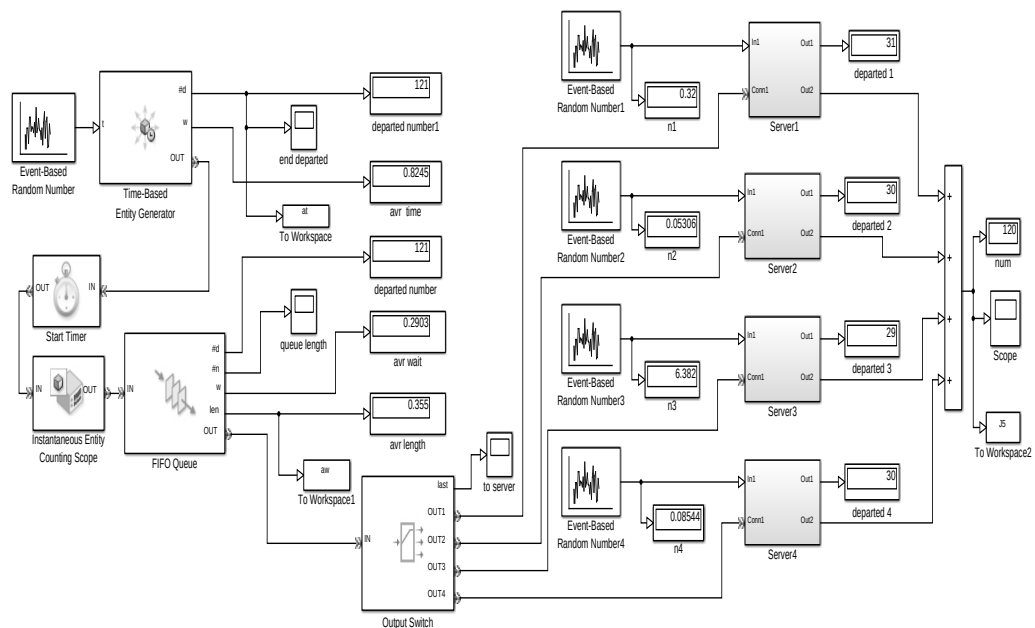


Рис. 1. Схема модели серверного комплекса (Server1...4)

Источником задач (заявок на обслуживание) является блок Time-Based Entity Generator, при этом для задания закона распределения и среднего времени между генерациями заявок используется блок Event-Based Random Number. Принималось, что входной поток заявок имеет экспоненциальный закон распределения с изменением длительности пауз между поступлением заявок в диапазоне 0,5...4 с. Задачи поступают в блок оче-

реди FIFO Queue. Из блока очереди через блок переключателя Output Switch заявки могут перемещаться к одной из четырех серверных станций. При этом реализуется круговое распределение нагрузки, то есть последовательное распределение задач перебором серверов по круговому циклу, что соответствует алгоритму Round-robin.

Каждый из серверов представлен соответствующей подсистемой Server1...4. На рис. 2 показана структура подсистемы Server1 – модели серверной станции.

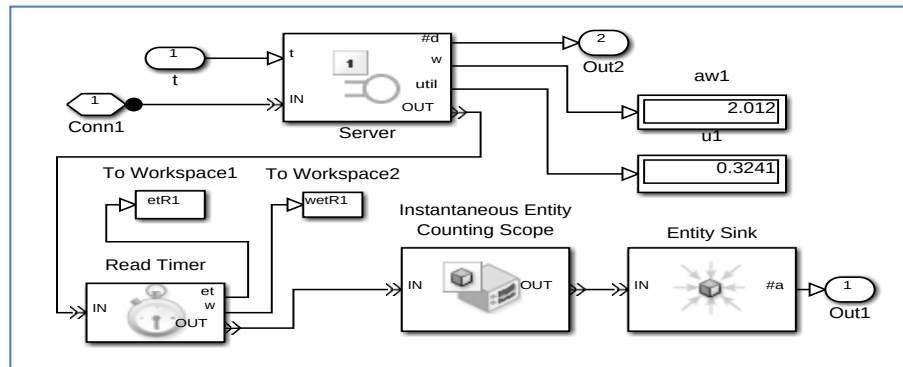


Рис. 2. Схема подсистемы модели сервера Server1

Основным элементом этой модели является канал обслуживания – собственно сервер (Server), который принимает на вход заявку и задерживает ее в течение времени обслуживания. Сигнал, соответствующий величине задержки, поступает на вход сервера от генератора случайной величины времени обработки заявки Processing time1 (тип блока – Event-Based Random Number). Принималось, что время обработки заявок серверами распределено по экспоненциальному закону (длительности обслуживания заявки 1...5 с).

Моделирование и оптимизация распределения нагрузки по серверным станциям. Для выполнения с помощью ГА в среде MATLAB оптимизации работы системы балансировки нагрузки (обеспечивающей выполнение наибольшего количества запросов пользователей J_n) вместо критерия количества обработанных заявок J_n использован критерий - J_n , для которого находится минимальное значение. Поиск параметров, доставляющих минимум критерию $J = -J_n$, осуществлялся с помощью m-файла (сценария в среде MATLAB), выполняющего многократные вызовы модели серверного комплекса с передачей параметров в генетический алгоритм. Для работы с функциями раздела MATLAB / Global Optimization Toolbox устанавливались требуемые опции генетического алгоритма и осуществлялся контроль процесса оптимизации. Для отыскания минимума критерия использовалась процедура `ga`, а создание структуры опций ГА реализовано оператором `gaoptimset`.

Так как при оптимизации осуществлялся поиск параметров системы, доставляющих минимум критерию $J=J(m_1, m_2, m_3, m_4)$, то для использования генетического алгоритма в качестве особи принят вектор параметров $x=(m_1, m_2, m_3, m_4)$. При этом параметры ГА устанавливались следую-

щие: число особей в популяции от 20 до 50; число поколений (генераций) – от 10 до 15. Начальные значения параметров (среднее время обслуживания заявки для каждого сервера m_i , $i=1...4$) случайным образом выбирались из принятого диапазона (от 0.5 до 5 с).

На каждом этапе работы алгоритма рассматривался вектор параметров x и соответствующее ему значение критерия J . Так как начальная популяция ГА формируется с использованием генератора случайных чисел, то для выбора лучшего из полученных решений выполнялось несколько реализаций расчетов. Рис. 3 – 4 иллюстрируют работу генетического алгоритма для одной из выполненных реализаций.

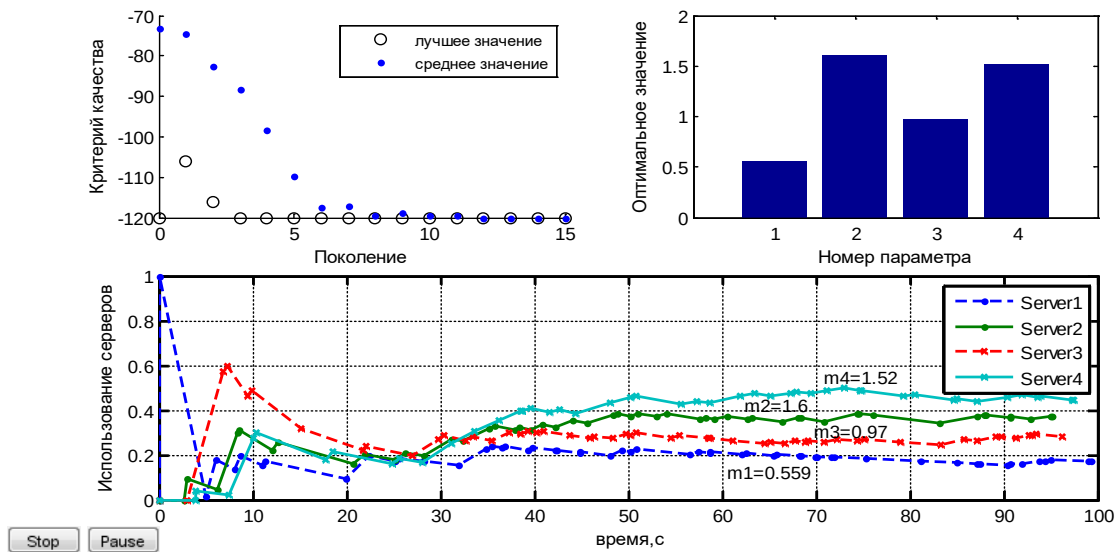


Рис. 3. Оптимизация распределении нагрузки по критерию максимума числа обработанных заявок: выбор среднего времени обслуживания заявки для каждого сервера с помощью генетического алгоритма

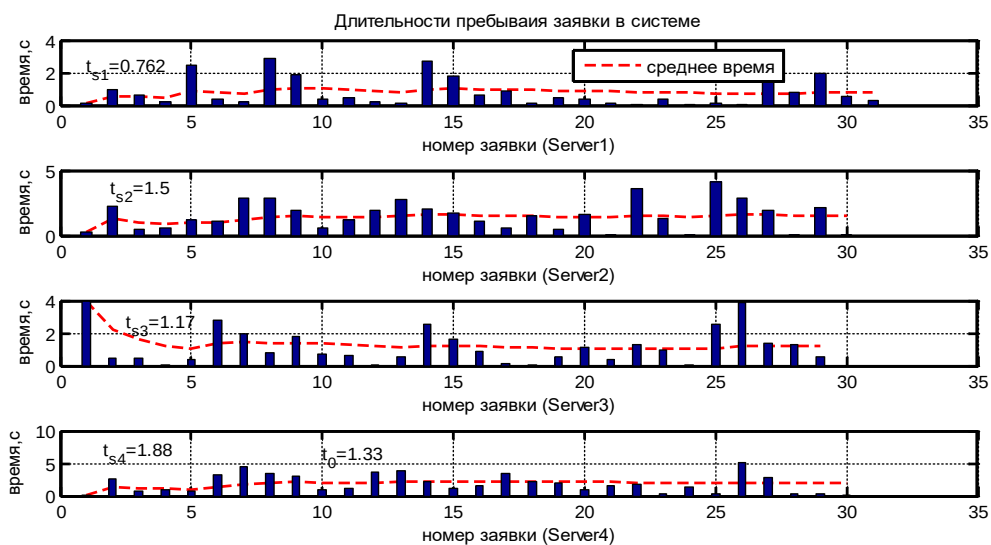


Рис. 4. Длительности обработки заявок серверами при оптимизации выбора серверов (по критерию максимума числа обработанных заявок)

При оптимизации распределении нагрузки (по критерию максимума числа обработанных заявок) рассматривались 15 поколений, процесс сошелся к 10 поколению (см. рис. 3). Для полученных оптимальных значений среднего времени обслуживания заявки для каждого сервера (особь генетических алгоритмов – гистограммы справа) приведены графики, характеризующие использование серверов при обработке запросов пользователей.

Временные характеристики работы серверного комплекса, представленные ниже (см. рис. 4), получены в результате оптимизации (установлено среднее время обслуживания для каждого сервера). Получено, что при распределении вычислительной нагрузки длительность обработки заявок каждым из серверов не превышает 4 с, обеспечивая максимальное количество запросов пользователей (обработано 120 запросов).

Заключение. На основании проведенного исследования сделан вывод о возможности применения генетического алгоритма для оптимизации распределения вычислительной нагрузки в серверном комплексе. При выборе вычислительных ресурсов для обработки данных в клиент-серверных информационных системах необходимо учитывать такой важный параметр как длительность обслуживания заявок. Оптимизация времени обслуживания заявок пользователей серверами позволит увеличить количество обработанных вычислительных задач, снизить время отклика системы, и тем самым повысить эффективность серверного комплекса.

Список литературы

1. Викулов Е.О., Леонов Е.А., Денисова Л.А. Автоматизированное распределение больших объемов данных высоконагруженных систем // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 3. С.146-149.
2. Денисов О.В. Имитационное моделирование распределения нагрузки в вычислительном комплексе с учетом сложности задач // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 330-335.
3. Ghomi E.J., Rahmani A.M., Qader N.N. Load-balancing algorithms in cloud computing: A survey / Journal of Network and Computer Applications. 2017.
4. Vikulov E.O., Denisov O.V., Denisova L.A. Data distribution system preparation of server stations data. Journal of Physics: Conference Series Ser. "Mechanical Science and Technology Update, MSTU 2018" 2018. С. 012097.
5. Alkhatib A., Sawalha T., Alzu'bi S. Load Balancing Techniques in Software-Defined Cloud Computing: an overview. 2020.
6. Денисова Л.А. Математическая модель цифровой системы регулирования с переменными параметрами // Автоматизация в промышленности. 2011. №9. С. 45-48.
7. Денисова Л.А. Многокритериальная оптимизация на основе генетических алгоритмов при синтезе систем управления. Омск: Омский государственный технический университет, 2014. 172 с.

8. Мещеряков В.А., Денисов В.П., Денисова Л.А. Обучение студентов имитационному моделированию систем массового обслуживания в MATLAB // Сборник материалов II Торгового форума Сибири. Омск, 2013. С. 179-181.

9. Simulink: software for numerical simulation of continuous processes. Available. [Электронный ресурс] URL: <http://www.mathworks.com/products/simulink> (дата обращения: 10.05.2024).

10. MATLAB SimEvents User's Guide [Электронный ресурс] URL: <http://www.mathworks.com> (дата обращения: 10.05.2024).

Денисов Олег Владимирович, ассистент, olegdenisov95@yandex.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

OPTIMIZATION OF LOAD DISTRIBUTION ACROSS SERVER STATIONS IN A
COMPUTING COMPLEX BASED ON A GENETIC ALGORITHM

O.V. Denisov

The article addresses issues related to load distribution among the computing resources of a server complex. It explores opportunities for enhancing the speed and performance of high-load client-server information systems by optimizing the distribution of computational load using a genetic algorithm.

Key words: computational load, server complex, optimization genetic algorithm, simulation model.

Denisov Oleg Vladimirovich, assistant, olegdenisov95@yandex.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 004.623

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-165-166

**МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ТРАКТА ДОВЕДЕНИЯ
ИНФОРМАЦИИ ДО ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

С.В. Чернобровкин

Статья посвящена разработке методики построения тракта, которая основана на решении транспортной задачи методом линейного программирования, использовании метода последовательного насыщения на основе алгоритма кумулятивных сумм для обнаружения аномалий в процессе передачи данных. Рассматриваемый подход, методы и алгоритмы, основанные на фрагментации данных позволяют повысить вероятность своевременного доведения информации, а также оптимизировать использование сетевых ресурсов, что подтверждается имитационным моделированием тракта доведения информации.

Ключевые слова: тракт доведения информации, подвижный объект специального назначения, метод последовательного насыщения, фрагментация данных, вероятность своевременного доведения.

В современном мире, где объемы передаваемых данных растут экспоненциально, а требования к своевременности их доведения становятся

все более строгими, актуальной задачей является разработка эффективной методики доведения информации до потребителей. Одним из перспективных подходов к решению этой задачи является фрагментация данных – разделение информации на меньшие части (фрагменты), которые передаются независимо друг от друга многопоточным способом. Такой подход позволяет не только повысить вероятность своевременной доставки данных, но и оптимизировать использование сетевых ресурсов, минимизировать задержки и повысить отказоустойчивость системы.

Фрагментация данных особенно важна в условиях нестабильных или перегруженных сетей, где традиционные методы передачи информации могут оказаться неэффективными. Разделение данных на фрагменты позволяет распределить нагрузку на сеть, избежать перегрузки отдельных каналов и обеспечить доставку даже в случае частичной потери или повреждения данных. Кроме того, фрагментация способствует повышению гибкости и адаптивности систем передачи данных, что особенно важно в условиях динамично изменяющейся сетевой среды.

Однако эффективное использование фрагментации данных требует разработки специализированной методики, которая учитывала бы особенности передачи фрагментированной информации. Такая методика должна включать алгоритмы оптимального разделения данных на фрагменты. Кроме того, важно учитывать такие факторы, как задержки передачи, вероятность потери пакетов, пропускную способность сети и требования к качеству обслуживания (QoS) [1].

Разработка методики построения тракта передачи фрагментированных данных позволит не только повысить своевременность доведения информации, но и создать основу для развития современных методов передачи значительных объемов информации до потребителей, обеспечивающих выполнение требований по своевременности доведения.

С целью выполнения поставленной задачи требуется разработать научно-методический аппарат, позволяющий максимизировать вероятность того, что время своевременного доведения информации до подвижных объектов специального назначения (ПО СН) не больше допустимого. Данная задача может быть решена путем формирования оптимального плана доведения информации с использованием группы серверов, обеспечивающих построение тракта доведения информации до ПО СН.

Исходными данными методики построения тракта доведения информации до ПО СН являются:

$A = \{a_i\}$ – множество серверов хранения;

$B = \{b_o\}$ – множество объемов информации;

$W = \{w_j\}$ – множество получателей;

$P = \{p_{cd}\}$ – множество вероятностей доведения информации;

$S = \{s_y\}$ – множество фрагментов информации;

$C = \{c_h\}$ – множество пропускных способностей каналов связи;

$RTT = \{rtt_{ij}\}$ – множество круговых задержек при передаче информации

между узлами a_i и w_j (сек);

$U = \{u_d\}$ – множество вариантов доведения информации в тракте.

С учетом введенных обозначений, научная задача формулируется следующим образом: разработать методику, позволяющую найти из множества возможных такой тракт доведения информации $X = \|x_{ij}\|$, при котором показатель вероятности своевременного доведения информации $P_{cd}(s) \rightarrow \max$.

$$MT = f(M, Z, U, K_\varphi) | P_{cd}(s) \geq P_{cd}^{mp}, \quad (1)$$

где M – модель процесса доведения информации до подвижных носителей [2]; $Z = f(A, Y)$ – множество характеристик системы доведения информации; $U = \{u_d\}$ – множество алгоритмов доведения информации в тракте; K_φ – множество характеристик квазистационарных объектов, $\{1 \dots \varphi\}$.

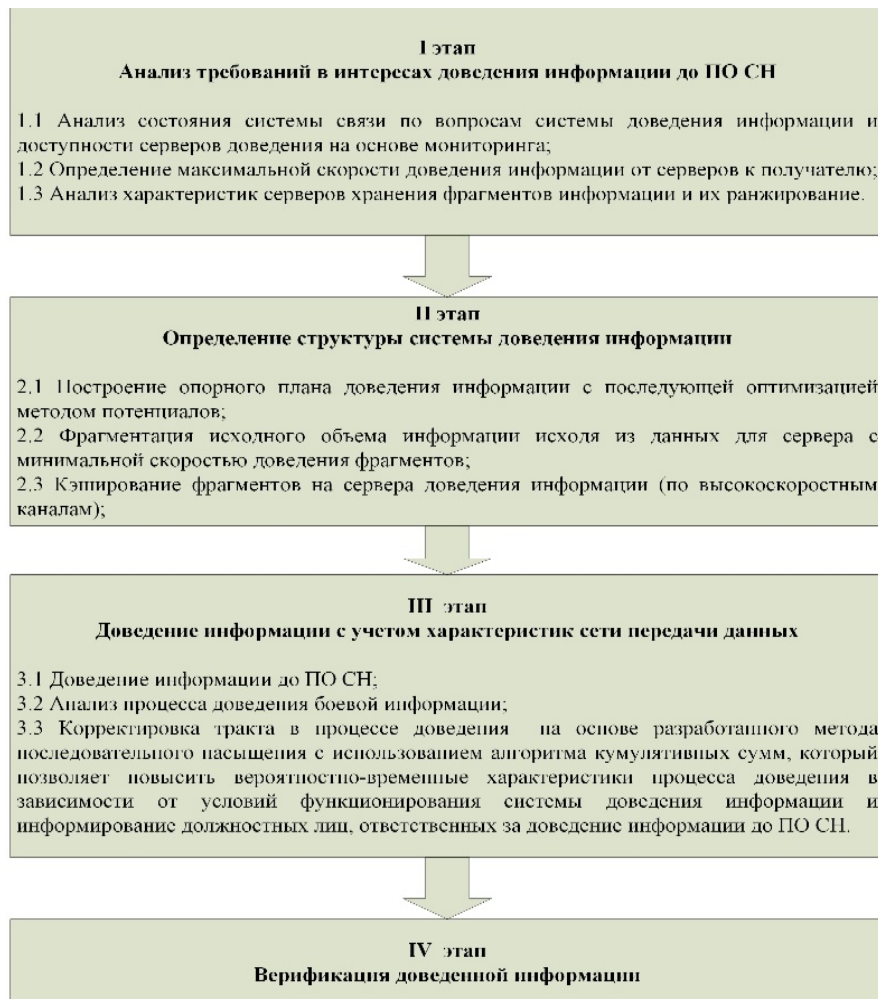


Рис. 1. Общая структура методики построения тракта доведения информации до подвижного объекта специального назначения

Выходными результатами методики являются:

$A^* = \{a_\mu\}, (\mu \in 1, \dots, I)$ – множество серверов хранения, обеспечивающих требуемую вероятность своевременного доведения информации;

$S^* = \{s_y^*\}$ – вариант фрагментации b_o , $S^* \in S$;

$E = \{\varepsilon_a\}$ – тракт доведения информации,

где $\varepsilon_a = \{1, \dots, A^*\} | t_{\text{дов}} \leq t_{\text{mp}}$.

Ограничения и допущения:

1. Доступен минимум один сервер для загрузки фрагментов;
2. $t_{\text{дов}} < 60$ мин;
3. $P_{\text{сд}}^{\text{mp}} \geq 0,97$.
4. Рассматривается построение тракта доведения информации до одного ПО СН.
5. Рассматривается доведение информации до потребителя объемом 10 Гбайт.

Этапы методики построения тракта доведения информации (рис.1) основаны на результатах работы модели процесса доведения информации [2] и включают следующие ключевые шаги, ориентированные на эффективное, надежное и своевременное доведение информации:

1. Анализ требований в интересах доведения информации до получателя;
2. Определение структуры системы доведения информации;
3. Доведение информации с учетом характеристик сети передачи данных;

Верификация доведенной информации.

На первом этапе методики проводится анализ сети передачи данных в интересах системы автоматизированного доведения информации с целью формирования исходных данных для вариантов построения тракта доведения информации. Важно определить технические и функциональные требования к системе автоматизированного доведения информации.

Данный этап включает:

- определение характеристик передаваемой информации (какую информацию из имеющегося перечня необходимо довести до ПО СН);
- выявление требований по временному ограничению.

На втором этапе разрабатывается начальный опорный план доведения информации, основанный на решении транспортной задачи методом линейного программирования.

Решение транспортной задачи заключается в том, чтобы найти оптимальный способ доведения информации от множества источников до ПО СН с минимальными затратами. Задача может быть представлена как таблица, в которой строки соответствуют поставщикам, а столбец потребителю, как показано в таблице.

В качестве затрат в исследовании принята круговая задержка (RTT), которая оказывает существенное влияние на скорость загрузки при учёте постоянного значения размера tcp пакета [3].

Математическая модель транспортной задачи имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m \varpi_{ij} &= a_i, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \varpi_{ij} &= \tau_j, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} Z(\tau) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n l_{ij} \varpi_{ij} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $Z(\tau)$ – затраты на доведение; l – оценочный показатель доставки; ϖ_{ij} – объем информации; a_i – объем информации на сервере; τ_j – потребность в объеме информации получателя информации; m – количество серверов; n – количество ПО СН.

Задача нахождения опорного плана

	Получатель 1 β_1	Получатель 2 β_2	Получатель 3 β_3	...	Получатель j β_j	Отправлено
Отправитель 1 α_1	ϖ_{11} l_{11}	ϖ_{12} l_{12}	ϖ_{13} l_{13}		ϖ_{1j} l_{1j}	a_1
Отправитель 2 α_2	ϖ_{21} l_{21}	ϖ_{22} l_{22}	ϖ_{23} l_{23}		ϖ_{2j} l_{2j}	a_2
Отправитель 3 α_3	ϖ_{31} l_{31}	ϖ_{32} l_{32}	ϖ_{33} l_{33}		ϖ_{3j} l_{3j}	a_3
...						
Отправитель i α_i	ϖ_{i1} l_{i1}	ϖ_{i2} l_{i2}	ϖ_{i3} l_{i3}		ϖ_{ij} l_{ij}	a_i
Доведено	τ_1	τ_2	τ_3		τ_j	$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n \tau_j$

Обозначим суммарный объем информации у всех поставщиков символом A , а суммарную потребность в грузе у всех потребителей – символом B .

Тогда:

$$A = \sum_{i=1}^m a_i, \quad B = \sum_{j=1}^n \tau_j \quad (3)$$

Транспортная задача называется закрытой, если $A = B$. При такой задаче от поставщиков будут доставлена вся информация, и все заявки потребителей будут удовлетворены. В рассмотренном примере это условие не выполняется ($A \neq B$), так как объемы информации на серверах можем считать бесконечными. Такая задача называется открытой. Для приведения задачи к закрытому виду вводится фиктивный получатель.

Процедура нахождения оптимального плана транспортной задачи имеет два этапа. На первом этапе находят предварительный (опорный) план транспортной задачи. Далее последовательно улучшают найденный опорный план до получения оптимального плана.

Наиболее распространены следующие методы:

- метод северо-западного угла;
- метод минимальной стоимости;

- аппроксимация Фогеля;
- метод двойного предпочтения.

Основными достоинствами метод аппроксимации Фогеля, который используется в исследовании, являются:

- близость начального плана к оптимальному;
- сокращение числа итераций оптимизации;
- учет структуры задачи;
- гибкость;
- простота реализации.

Этот метод может быть особенно полезен в сложных задачах с большими объемами данных, поскольку он позволяет быстро и с минимальными вычислениями найти решение.

С целью оптимизации опорного плана для решения данной задачи используется метод потенциалов.

Достоинствами метода потенциалов являются:

- точная проверка оптимальности плана;
- эффективное улучшение плана;
- использование двойственности;
- сокращение числа итераций;
- интеграция с другими методами.

- подходит для задачи с большими объемами данных, поскольку позволяет на каждом шаге ограничиться локальными улучшениями, избегая грубых изменений, что ускоряет поиск оптимального решения [4].

План $X^* = (x_{ij}^*)$ транспортной задачи будет оптимальным, если существует система $(m+n)$ чисел α_i, β_j , называемых потенциалами поставщиков и потребителей соответственно, удовлетворяющая условиям:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i + \beta_j + l_{ij} &= 0, \text{ для } x_{ij} > 0, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \\ \alpha_i + \beta_j + l_{ij} &\geq 0, \text{ для } x_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{opt } X \quad (4)$$

Этапы оптимизации транспортной задачи методом потенциалов представлен на рисунке 2.

Из анализа полученных данных в результате нахождения оптимального плана доведения информации определяются сервера, на которые будет кэшироваться информация.

Информация кэшируется на сервера по высокоскоростным каналам (с пропускной способностью до 40 Гбит/с), до ПО СН доводится метафайл, в котором указываются сервера хранения, количество фрагментов, контрольные суммы и другая необходимая информация в интересах процесса доведения.

После получения подтверждения о получении файла метаданных на третьем этапе методики осуществляется проверка доступности сервера и инициализирует процесс загрузки информации.

С целью оптимизации доведения информации до ПО СН на основе проведенного анализа предлагается использовать метод последовательного насыщения.

В интересах метода последовательного насыщения метод на основе анализа изменений кумулятивных сумм времени доведения фрагментов информации для каждого из задействованных серверов.

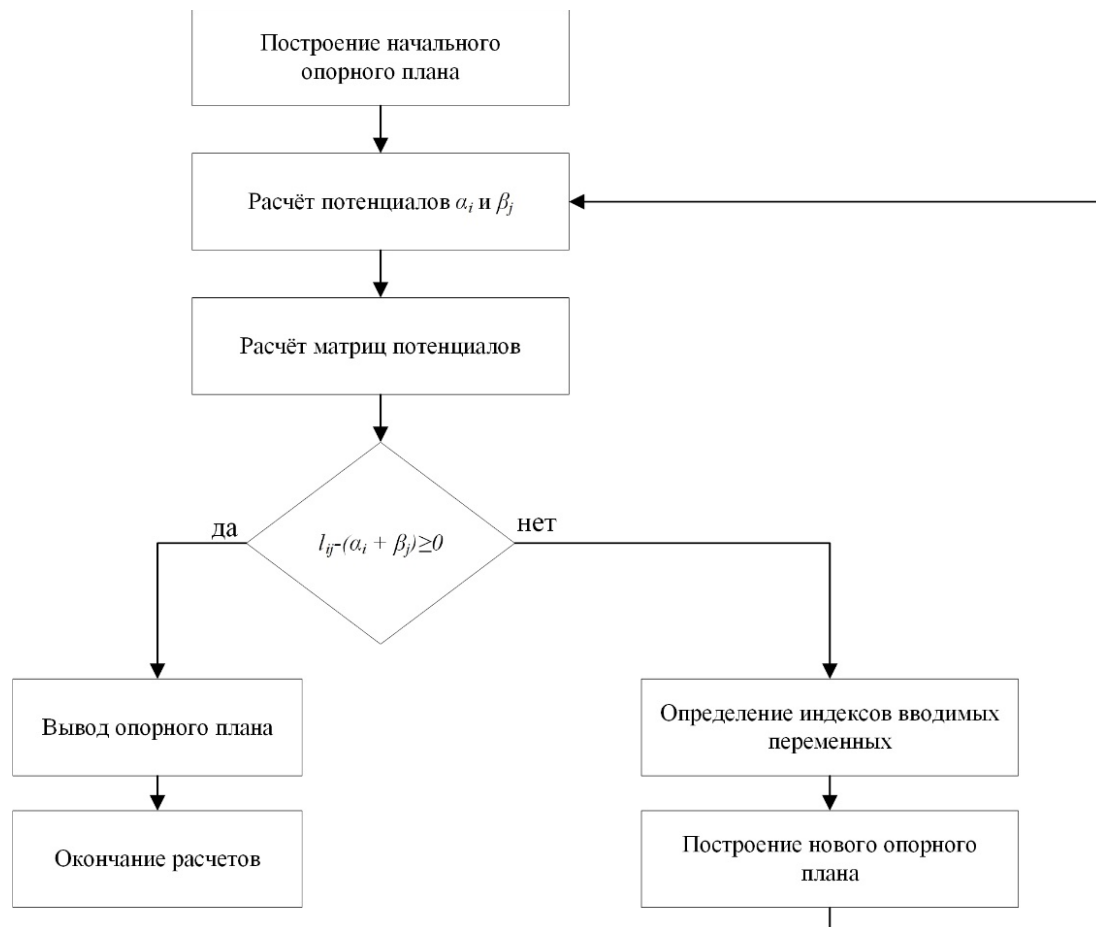


Рис. 2. Этапы оптимизации транспортной задачи методом потенциалов

Задача анализа отклонений времени доведения от порогового времени на основе алгоритма кумулятивных сумм является сложной, поскольку каждый сервер может иметь свою скорость передачи данных, которая варьируется во времени в зависимости от различных факторов (нагрузка на каналы передачи данных, деструктивные воздействия на элементы системы доведения информации (СДИ), и др.). Данные, получаемые ПО СН от серверов, будут собираться и агрегироваться, что создаст комбинированную динамику процесса передачи.

Целью анализа отклонений времени доведения от порогового времени на основе алгоритма кумулятивных сумм является обнаружение изменений (аномалий) в процессе доведения на основе накопленных отклонений от порогового значения.

Особенностью алгоритма является то, что он учитывает кумулятивные отклонения, что делает его чувствительным к малым, но систематическим изменениям.

Основные этапы алгоритма анализа изменений кумулятивных сумм:

- сбор данных;
- расчет кумулятивных сумм;
- сравнение результатов с пороговыми значениями;
- анализ маршрутов;
- интерпретация результатов;
- оптимизация.

На этапе расчёта кумулятивных сумм вычисляются кумулятивные суммы отклонений S_i для каждого маршрута согласно выражению:

$$S_i = S_{i-1} + (t_i - T_{порог}), \quad (5)$$

где, $T_{порог}$ – пороговое время загрузки.

Для каждого маршрута рассчитывается кумулятивная сумма отклонений S_i (5).

На следующем этапе алгоритма анализа кумулятивных сумм анализируются кумулятивные суммы для каждого маршрута с целью обнаружения аномалий $S_i > h$, где h – порог для обнаружения аномалий.

Если для маршрута $S_i > h$, это указывает на аномалию (например, перегрузку или сбой). Трафик может быть перенаправлен на альтернативные маршруты.

На следующем этапе результаты анализа интерпретируются для принятия решений в целях определения причин аномалий (например, перегрузка канала, сбой оборудования), оценки влияния аномалий на производительность сети и, при необходимости, визуализация полученных результатов.

Для анализа процесса доведения рассчитывается эффективность использования тракта.

Предположим, что между сервером j и получателем k есть тракт, который имеет максимальную пропускную способность C_{jkmax} . Тогда эффективность использования тракта E_{jk} можно рассчитать:

$$E_{jk} = \frac{Y}{C_{jkmax}T}, \quad (6)$$

где Y – общий объем данных, который необходимо передать от сервера j к получателю k ; C_{jkmax} – максимальная пропускная способность тракта между сервером j и получателем k ; T – фактическое время доведения информации.

Это выражение показывает насколько эффективно используется тракт между сервером j и получателем k .

Фактическое время работы канала T можно рассчитать согласно выражения:

$$T = \frac{Y}{C_{jkeff}}, \quad (7)$$

где C_{jkeff} – эффективная скорость загрузки данных (учитывает задержки, потери и т.д.).

Если $E_{jk}(t) = 1$, это означает, что канал используется на полную мощность, то есть данные передаются с максимальной возможной скоростью для этого канала.

Если $E_{jk}(t) < 1$, это означает, что канал не используется полностью, и есть возможность увеличения скорости передачи.

Если $E_{jk}(t) > 1$, это может свидетельствовать о том, что данные передаются с превышением максимальной пропускной способности канала (это может быть ошибкой в расчетах или сжатием данных).

Эффективная скорость загрузки (учитывает задержки, потери и т.д.) для протокола транспортного уровня tcp напрямую зависит от круговой задержки (RTT), так как RTT влияет на то, как быстро могут быть переданы данные и получены подтверждения (ACK) о их получении. Круговая задержка — это время, которое требуется для того, чтобы пакет данных прошел от источника до получателя и обратно.

Общий порядок определения круговой задержки следующий:

На транспортном уровне модели TCP/IP данные отправляются с определенным размером окна (tcp окно), который ограничивает количество неаккредитованных данных, которые могут находиться в сети одновременно.

Это окно скольжения (или скользящее окно) регулирует, сколько данных может быть отправлено, прежде чем необходимо будет дожидаться ACK .

Чем выше RTT , тем больше времени необходимо для получения подтверждения каждого пакета. Это означает, что передача данных будет медленнее, так как каждый пакет требует больше времени для получения ответа.

Если RTT увеличивается, протокол tcp может быть вынужден ждать подтверждений для большего числа пакетов, что снижает общую пропускную способность, даже если окно скольжения достаточно большое. В то же время увеличение размера окна может помочь компенсировать влияние RTT .

$$\zeta_{tcp} = \frac{cwnd}{RTT}, \quad (8)$$

где ζ_{tcp} – скорость загрузки в битах в секунду; $cwnd$ – размер окна tcp в битах; RTT – круговая задержка в секундах.

Из выражения (7) видно, что увеличение RTT будет пропорционально снижать пропускную способность, при фиксированном размере окна. Это особенно важно для сетей с высокой задержкой (например, в спутниковых каналах связи).

В случае высоких RTT протокол tcp может страдать от низкой пропускной способности, так как при большом времени ожидания подтверждений протокол tcp не может эффективно использовать полосу пропускания канала.

Для улучшения этой ситуации можно использовать увеличение окна скольжения протокола *tcp*, так как из выражения (7) следует, что чем больше окно скольжения протокола *tcp*, тем больше данных может быть отправлено до получения подтверждений.

Таким образом, скорость загрузки в протоколе *tcp* пропорциональна размеру окна и обратно пропорциональна круговой задержке, что делает *RTT* важным фактором для оценки эффективности передачи данных в сети.

В результате расчетов (8) получим, что при размере окна 64 Кбит и круговой задержке 60 мс скорость загрузки составит 8,7 Мбит/с при пропускной способности тракта 50 Мбит/с.

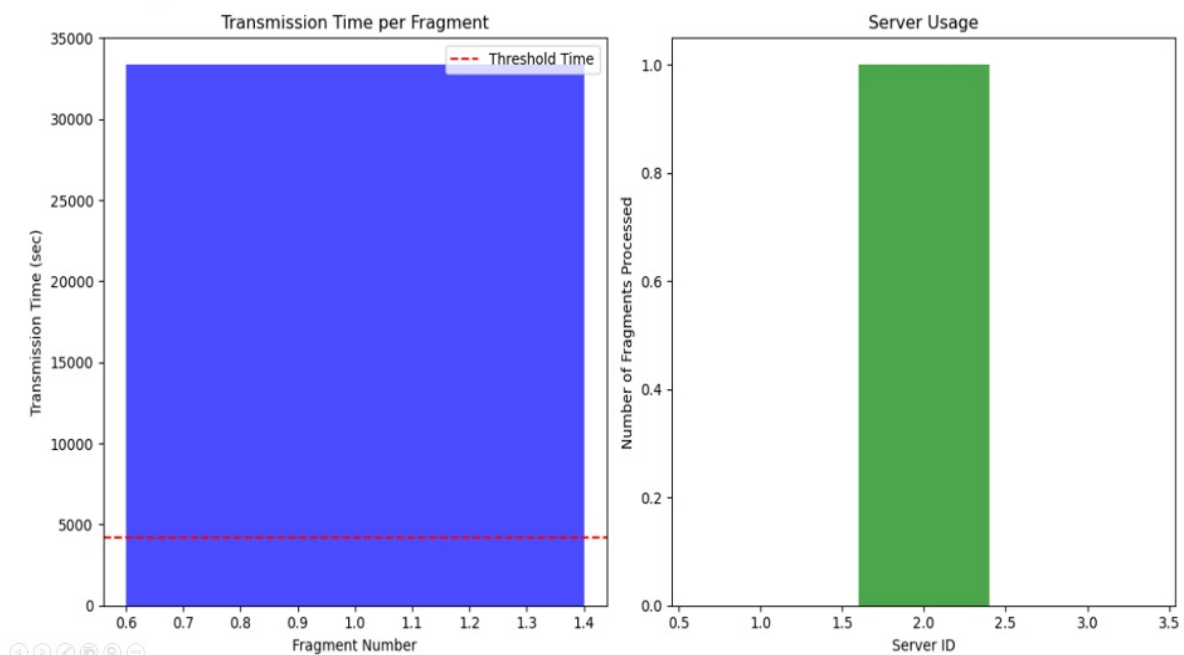


Рис. 3. Оценка доведения информации до подвижного объекта специального назначения

В ряде автоматизированных систем специального назначения (АС СН) в настоящее время реализовано доведение с *ftp*-серверов, причем информация доводится с одного сервера, что в большинстве случаев не позволяет сократить сроки доведения информации, а в некоторых случаях может привести к превышению сроков доведения информации, что в некоторых ситуациях является критически важным. На рис. 3 графически показано, что при наличии трех серверов для доведения информации процесс доведения в рассматриваемых АС СН происходит с одного сервера. При учете характеристик, влияющих на процесс доведения (пропускная способность, вероятность своевременного доведения и т.п.) время доведения информации значительно превышает допустимое время доведения информации до потребителя.

На рис. 4 показана зависимость коэффициент эффективности использования тракта от времени загрузки при указанном выше способе до-

ведения. Видно, что скорость загрузки информации достигает значения, которое составляет около 20 % от пропускной способности тракта доведения при наличии трех серверов для доведения.

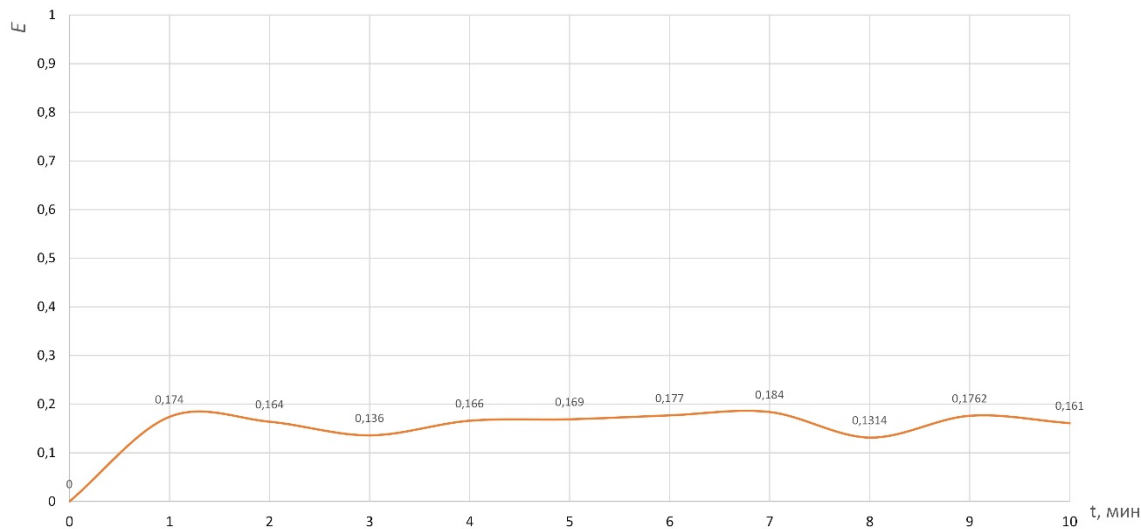


Рис. 4. Коэффициент эффективности использования тракта (E)

Далее, на этапе оптимизации, принимаются меры для повышения эффективности использования производительности сети с целью перенаправления трафика на менее загруженные маршруты, оптимизации параметров алгоритма (например, порога h) и масштабирование системы (например, добавление серверов для доведения информации).

При $E_{jk}(t) < 1$ методика предусматривает ранжирование списка серверов с фрагментами информации, и на его основе добавление дополнительных серверов для инициализации загрузки. После определения следующего наиболее предпочтительного сервера. Одновременная загрузка с нескольких *ftp*-серверов может значительно ускорить процесс передачи данных, что особенно важно для задач, работающих с большим объемом информации объемом более нескольких гигабайт. Использование нескольких соединений позволяет оптимально распределять нагрузку и минимизировать время ожидания, что повышает эффективность доведения информации до потребителей.

Таким образом, при достаточной пропускной способности тракта доведения информации и загрузки с нескольких серверов, повышается скорость доведения информации.

В результате использования многопоточного доведения информации, фрагментированной на основании модели процесса доведения информации до подвижных носителей [2], применении метода последовательного насыщения на основе алгоритма кумулятивных сумм, время доведения информации не превышает допустимого значения, как показано на рис. 5, при котором доведение фрагментов осуществляется одновременно с трех серверов.

На рис. 6 показана зависимость скорости доведения информации от времени загрузки с учетом алгоритма последовательного насыщения. Исходя графика видно, что скорость загрузки информации достигла значения, которое составляет порядка 80 % от пропускной способности тракта доведения.

Из рис. 6 видно, что при доведении фрагментированной информации пропускная способность при одинаковых условиях функционирования элементов СДИ, но при различных способах доведения коэффициент использования тракта доведения значительно возрос, что говорит о более эффективном способе доведения информации.

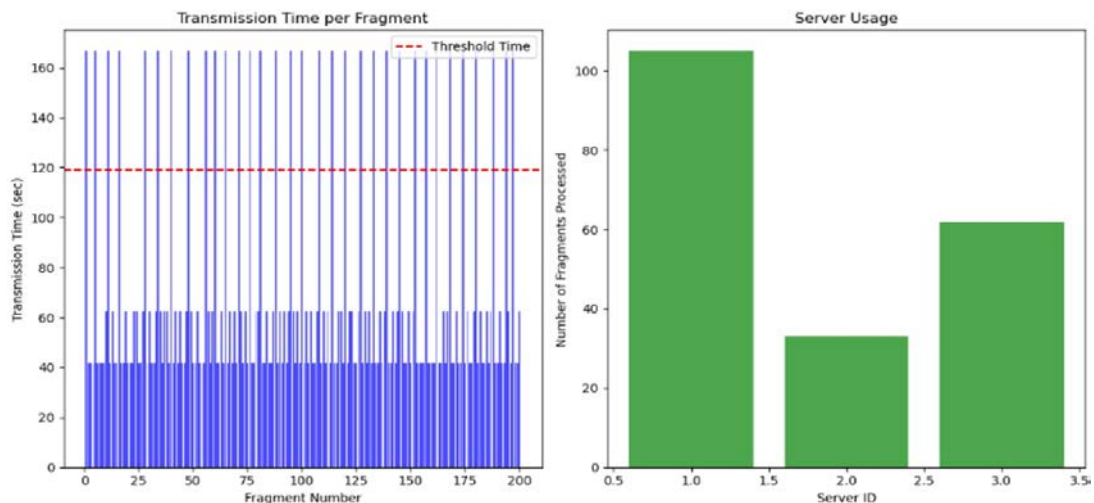


Рис. 5. Оценка доведения информации до подвижного объекта специального назначения с учетом метода последовательного насыщения



Рис. 6. Коэффициент эффективности использования тракта (E) после применения метода последовательного насыщения на основе алгоритма кумулятивных сумм

Выводы. Разработанная методика построения тракта доведения информации до ПО СН, основанная на применении модели процесса доведения информации и решении транспортной задачи методом линейного программирования, позволяет более эффективно использовать ресурсы сети передачи данных в интересах СДИ на основе разработанного алгоритма последовательного насыщения. В сочетании с применением алгоритма кумулятивных сумм позволяет проводить реконфигурации трактов доведения обеспечения своевременного доведения информации в условиях деструктивных воздействий на сеть передачи данных.

Список литературы

1. Цимбал В. А. Методика оценивания своевременности доведения многопакетных сообщений по виртуальным маршрутам в сети передачи данных / В. А. Цимбал, С. Е. Потапов // Региональная информатика и информационная безопасность: Сборник трудов XII Санкт-Петербургской межрегиональной конференции, Санкт-Петербург, 27–29 ноября 2021 года. Том Выпуск 10. – Санкт-Петербург. – 2021. – С. 341-345.
2. Чернобровкин С.В. Модель процесса доведения информации до подвижных носителей / С.В. Чернобровкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 12. С. 136-140.
3. Abdul Sattar Soomro, Muhammad Junaid, Gurudeo Anand Tularam Modified Vogel's Approximation Method For Solving Transportation Problems// Mathematical Theory and Modeling, Vol.5, No.4, 2015.
4. Турсунов, Д. Г. Оптимизация транспортных потоков в городской транспортной системе с использованием имитационного моделирования // Молодой ученый. 2022. № 14 (409). С. 11-16.
5. Димаки А.В., Светлаков А.А. Применение алгоритма кумулятивных сумм при рекуррентном оценивании параметров нестационарных объектов управления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 2(145). С. 100-103.
6. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Моделирование алгоритма кумулятивных сумм в прикладных задачах обнаружения сигналов со случайным моментом появления в негауссовских помехах // Радиотехника. 2021. № 4. С. 66-76.
7. Чоу Э. Python для сетевых инженеров. Автоматизация сети, программирование и DevOps. Санкт-Петербург. Питер, 2023. 528 с.

Чернобровкин Сергей Владимирович, адъютант, sergei-chernobro@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного

METHODOLOGY OF BUILDING A PATH OF INFORMATION DELIVERY TO MOBILE OBJECTS SPECIAL PURPOSE

S.V. Chernobrovkin

The article is devoted to the development of a methodology for building a path, which is based on the solution of the transportation problem by linear programming, the use of the method of sequential saturation based on the algorithm of cumulative sums to detect anomalies in the process of data transmission. The considered approach, methods and algorithms based on data fragmentation allow to increase the probability of timely information delivery, as well as to optimize the use of network resources, which is confirmed by simulation modeling of the information delivery path.

Key words: information delivery path, special purpose mobile object, sequential saturation method, data fragmentation, probability of timely information delivery.

Chernobrovkin Sergei Vladimirovich, adjunct, sergei-chernobro@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 004:378

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-178-179

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТНОЙ МОДЕЛИ СПЕЦИАЛИСТА

Е.В. Шевчук, А.Д. Шишкин, М.А. Петрова

Дефицит квалифицированных кадров, соответствующих современному уровню развития науки, техники и технологий, признан одним из основных факторов, влияющих на экономическую ситуацию. В современных условиях высокоскоростного развития технологий и наращивания знаний решением проблемы дефицита квалифицированных кадров является обеспечение ускоренной адаптации системы профессионального образования к изменениям запросов и ожиданий рынка труда, что, в свою очередь, затруднительно реализовать без решения задачи непрерывного мониторинга тенденций рынка труда. Авторы предлагают идею проектирования компетентностной модели востребованного специалиста с использованием методов системного анализа данных агрегаторов вакансий в контексте требований к профессиональным и личностным качествам соискателей. Целью исследования является совершенствование методов повышения конкурентоспособности выпускников организаций образования в контексте цифровой трансформации общества. Результатом исследования является цифровая трансформация процесса проектирования и актуализации компетентностной модели выпускника, соответствующей современным требованиям работодателей. Результаты исследования могут быть полезны для руководителей образовательных программ, специалистов по кадрам, обучающихся, соискателей и работодателей.

Ключевые слова: большие данные, качество образования, компетентностная модель выпускника, управление образовательными программами, системный анализ, трудоустройство, цифровая трансформация.

В докладе Национального совета при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям (Москва, 2024 г.) было отмечено, что «недостаток квалифицированных кадров вышел на первое ме-

сто среди ключевых ограничений развития бизнеса» [1], что связано, в первую очередь, с постоянно ускоряющимся темпом эволюции компетентностной модели востребованного современного специалиста. В современных условиях высокоскоростного развития технологий и наращивания знаний [2] в качестве решения проблемы дефицита квалифицированных кадров была обозначена задача обеспечения ускоренной адаптации системы профессионального образования к изменениям запросов и ожиданий рынка труда, включая «обеспечение ускоренной актуализации профессиональных образовательных программ» высшего образования и среднего профессионального образования, а также дополнительных профессиональных программ повышения квалификации и профессиональной переподготовки.

Проектом «Цифровые кафедры» реализующимся в рамках федерального проекта «Развитие кадрового потенциала ИТ-отрасли» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [3], определены основные принципы разработки и реализации дополнительных профессиональных программ профессиональной переподготовки ИТ-профиля, также включающие в себя требование непрерывной актуализации их содержания в соответствии с тенденциями рынка труда. Для реализации этого продиктованного временем требования необходимо организовать процесс мониторинга динамики рынка труда. Традиционно известные методы (например, семинары, круглые столы с работодателями, опросы, анкетирования и т.п.) в эпоху глобализации уже нерепрезентативны и нерезультативны. По мнению авторов настоящей статьи, в рамках цифровой трансформации общества заслуживает внимания идея проектирования компетентностной модели востребованного специалиста с использованием методов системного анализа данных агрегаторов вакансий в контексте требований к профессиональным и личностным качествам соискателей.

Цифровая трансформация коснулась всех сфер жизни современного общества [4-8], и образование не стало исключением. В соответствии с Указом Президента РФ от 07.05.2024 N 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», цифровая трансформация является одной из национальных целей развития, среди которых определено достижение «цифровой зрелости» сферы образования к 2030 году, включая развитие цифровых сервисов и технологий обработки больших объемов данных [9,10].

В системе образования в настоящее время активно реализуются процессы цифровой трансформации [7-9,11,12].

Развиваемая авторами настоящей статьи концепция цифровой трансформации процесса проектирования компетентностной модели конкурентоспособного специалиста на основе анализа данных агрегаторов вакансий изначально была разработана для использования непосредственно в заведениях высшего образования [13-14].

Основная идея концепции, предлагаемой авторами настоящей статьи, - автоматизировать статистический анализ и обработку данных ва-

кансий агрегаторов в реальном времени с целью генерации соответствующих цифровых отчетов, способствующих принятию решений по управлению различными процессами образовательной организации (в частности, проектирования модели конкурентоспособного выпускника, проектирования и актуализации образовательных программ, трудоустройства выпускников, профориентационной деятельности, планирования конкурентоспособного перечня образовательных программ, в том числе дополнительных профессиональных программ повышения квалификации и профессиональной переподготовки, и т.п.).

Открытые данные агрегаторов вакансий включают актуальную информацию о количестве вакансий, их характеристиках, о распределении по отраслям и регионам, данные о заработной плате, требованиях к кандидатам и др.

В качестве источника для сбора и анализа информации разработанной автоматизированной системы актуализации компетентностных моделей выпускников вуза [13-14] был выбран HeadHunter – один из крупнейших сайтов по поиску работы и сотрудников в мире, обрабатывающий до 3000 запросов в секунду. По данным SimilarWeb, HeadHunter занимает четвертое место в мире по популярности среди порталов по поиску работы и сотрудников [15].

Методика оценки конкурентоспособности предполагает составление компетентностной модели работника, востребованного на рынке труда в данный момент. Это необходимо для того, чтобы сформировать ориентир, к которому должен стремиться обучающийся. Для решения данной задачи необходимо постоянно проводить мониторинг соответствия содержания образовательных программ реальной ситуации на рынке труда (рис. 1).

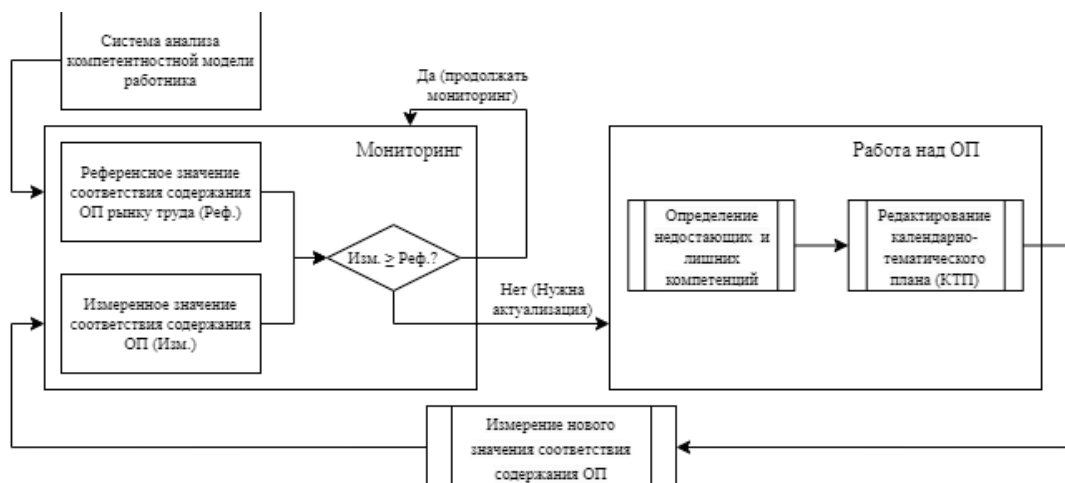


Рис. 1. Схема процесса актуализации образовательных программ

Для решения задачи обеспечения мониторинга была разработана программа для автоматического сбора данных вакансий, которые находятся в открытом доступе на сайте агрегатора вакансий HeadHunter [16].

Логическая структура информационной системы описывает состав модулей переработки информации, образующих эту систему, а также информационные и управляющие взаимосвязи между ними (рис. 2).

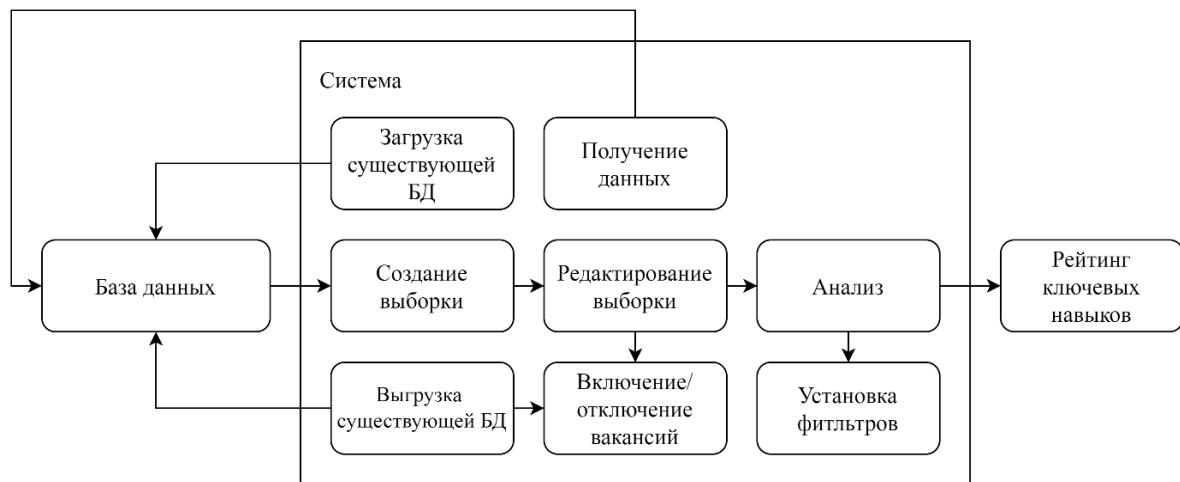


Рис. 2. Логическая структура системы

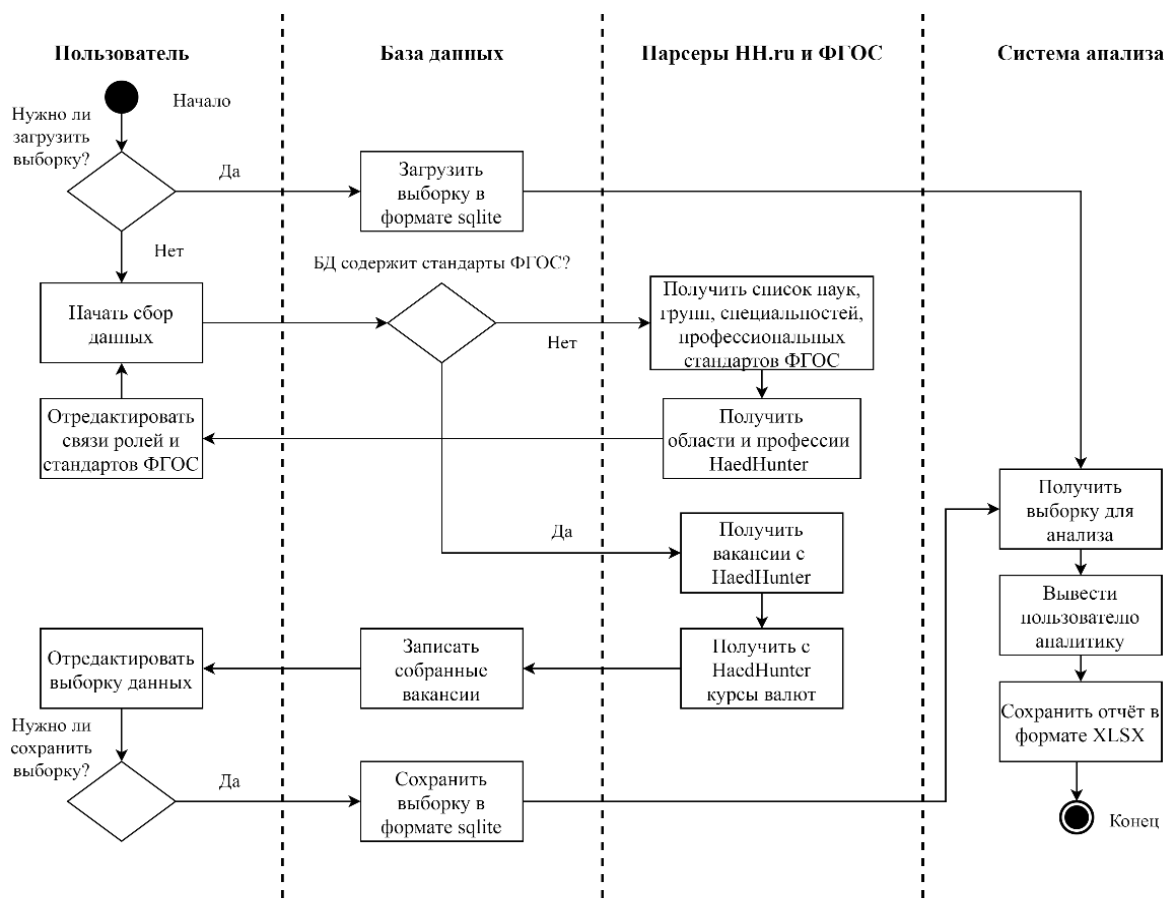


Рис. 3. Схема работы системы

Программа написана с использованием языка программирования Python и фреймворка Qt, что позволяет собрать и запустить её под следующими операционными системами: Microsoft Windows, GNU/Linux дис-

трибутивах, macOS. Поддержка GNU/Linux дистрибутивов содействует более плавному переходу на отечественные операционные системы на основе ядра Linux, при этом программа сохраняет функциональность, аналогичную работе в Microsoft Windows. Компилятор PyInstaller используется для создания единого исполняемого файла, что позволяет формировать исполняемый EXE-файл для Microsoft Windows, ELF-файл для GNU/Linux дистрибутивов и Bundle для macOS. База данных SQLite применяется в качестве встроенного механизма хранения данных, что исключает необходимость установки дополнительных серверов баз данных, таких как PostgreSQL или MariaDB, поскольку возможностей SQLite достаточно для текущих задач.

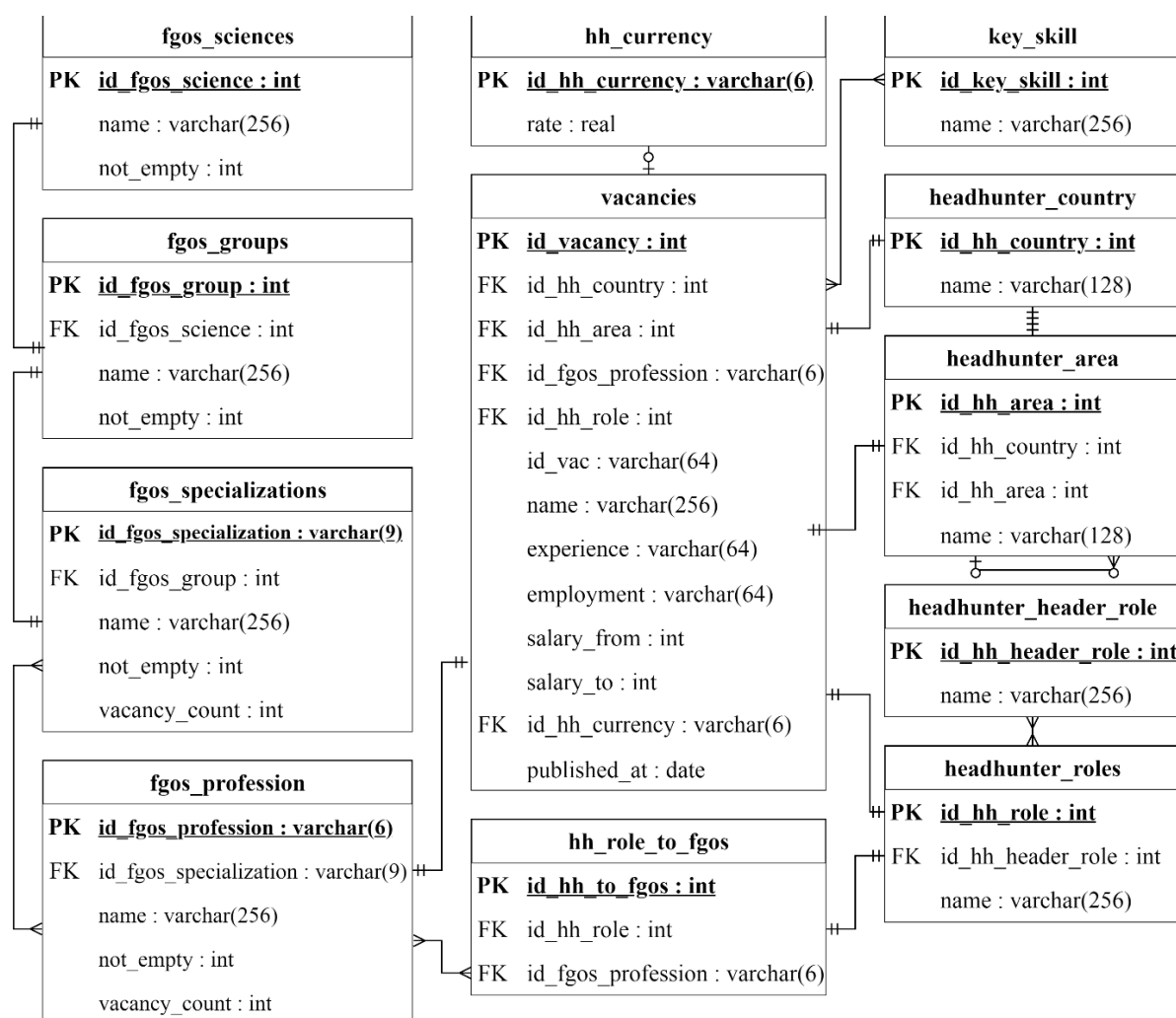


Рис. 4. Структура базы данных

Система имеет модули для парсинга вакансий с сайта HeadHunter и информации об актуальных профессиональных стандартах с официальных сайтов федеральных государственных образовательных стандартов.

Основной цикл работы программы представлен на рис. 3.

Использование SQLite упрощает интеграцию баз данных и позволяет эффективно управлять данными о вакансиях. SQLite является легковес-

ной и популярной системой управления базами данных, хорошо подходящей для небольших проектов и прототипов. Она не требует сложной настройки и администрирования, что упрощает интеграцию базы данных в информационно-аналитическую систему.

Программе требуется база данных для хранения данных ФГОС, HeadHunter ролей, областей, ключевых навыков, курсов валют. Перед тем как создавать схему базы данных, была создана модель, по которой она будет спроектирована (рис. 4).

Для удобства работы с базами данных созданы скрипты. Так, например, для перевода файлов из XML-формата, который Qt Designer передаёт в файл Python, был написан скрипт, который рекурсивно проходит все файлы формата UI и использует для их перевода pyside6-uis.

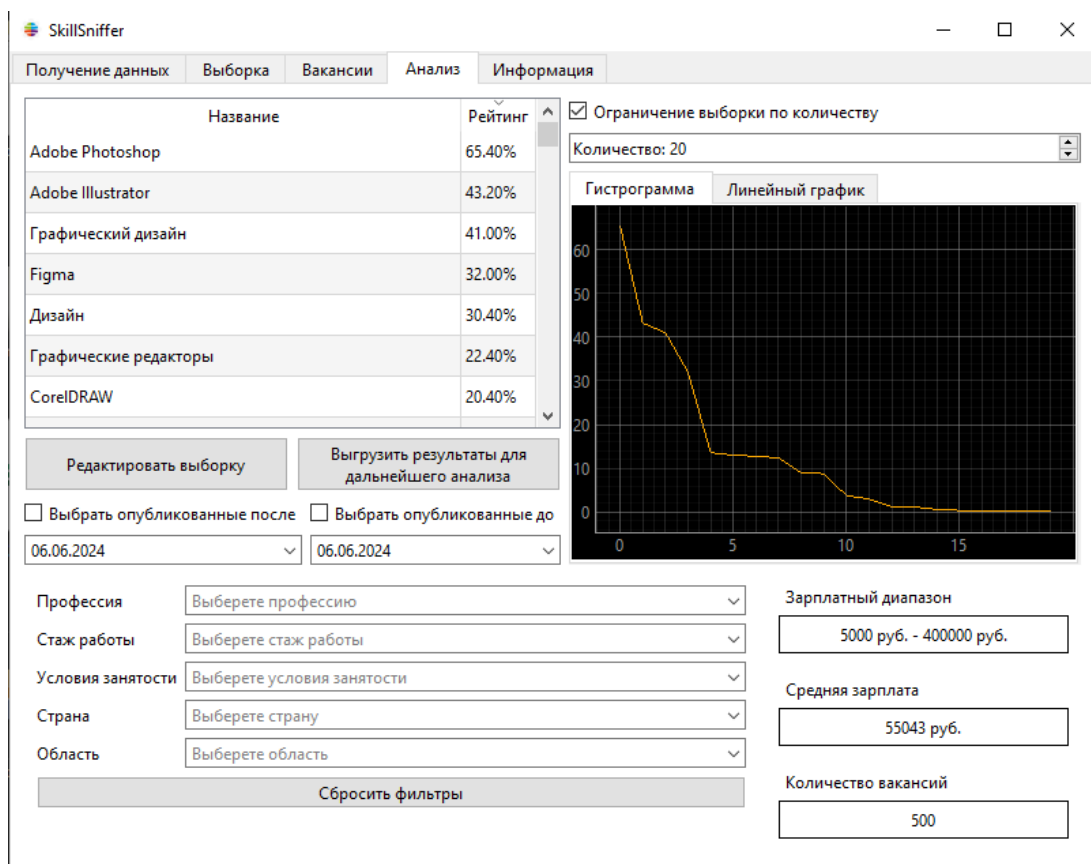


Рис. 5. Интерфейс окна анализа данных

В системе реализована возможность создания мультиязычного интерфейса. Для этого написан отдельный скрипт, генерирующий файлы перевода. Эти файлы сохраняют парную связь строк перевода с соответствующими строками оригинала для каждого конкретного языка. Пользователи могут взаимодействовать с этими файлами при помощи графического интерфейса и вносить переводы вручную. Скрипт обновляет или создает файлы ts для каждого языка, указанного в массиве LOCALE, где язык задаётся в формате (например, «ru_RU», «en_US»). Для генерации этих файлов используется инструмент pyside6-lupdate.

Разработанная для тестирования технологии программа позволяет собирать с выбранного сайта вакансии по заданным критериям. Например, необходимо разработать или актуализировать образовательную программу по курсу дополнительного образования «Компьютерная графика и дизайн». Для этого при сборе вакансий необходимо указать профессиональный стандарт 06.025 «Специалист по дизайну графических пользовательских интерфейсов». В него включена роль HeadHunter «Дизайнер, художник», что подходит для проведения эксперимента.

В процессе тестирования по запросу было собрано 500 вакансий для составления выборки. После редактирования и фильтрации выборки появляется возможность анализа.

В окне аналитики представлена информация о зарплатных диапазонах, средней зарплате по всей выборке и рейтинг ключевых навыков в процентном соотношении, показывающем частоту появления навыка в вакансиях (рис. 5).

Представленное количество собранных вакансий возможно экспортировать в формат XLSX (таблице).

Рейтинг ключевых навыков в собранных вакансиях

№	Фильтры	Значение
0	Время создания	05.06.24 23:59:16
1	Зарплатный диапазон	5000 руб. - 400000 руб.
2	Средняя зарплата	55043 руб.
3	Количество вакансий	500
	Название	Рейтинг
1	Adobe Photoshop	65,40%
2	Adobe Illustrator	43,20%
3	Графический дизайн	41,00%
4	Figma	32,00%
5	Дизайн	30,40%
6	Графические редакторы	22,40%
7	CorelDRAW	20,40%
8	Web-дизайн	16,40%
9	Обработка изображений	13,60%
10	Adobe InDesign	13,20%



Рис. 6. Диаграмма ключевых навыков

В приведенном примере по результатам анализа можно сделать вывод, что лидирующее значение по востребованности на рынке труда занимают умения работать в программах Adobe Photoshop и Adobe Illustrator. Для наглядности в системе предусмотрена возможность визуального представления результатов анализа (рис. 6).

Результатом исследования явилась концепция цифровой трансформации процесса проектирования и актуализации компетентностной модели выпускника в соответствии с ожиданиями рынка труда (рис.7) и ее практическая реализация.

Разработана программа для автоматического сбора и анализа данных вакансий по заданным критериям (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663194) [16], анализирующая и обрабатывающая актуальные данные агрегаторов в реальном времени с целью генерации соответствующих цифровых отчетов, способствующих принятию решений по управлению такими процессами образовательной организации, как проектирование компетентностной модели конкурентоспособного выпускника, проектирование и актуализация образовательных программ, трудоустройство выпускников, профориентационная деятельность, планирование конкурентоспособного перечня образовательных программ.



Рис. 7. Цифровая трансформация процесса проектирования и актуализации компетентностной модели выпускника в соответствии с ожиданиями рынка труда

По результатам представленного исследования можно сделать следующие выводы:

совершенствование технологии проектирования и актуализации компетентностной модели востребованного на рынке труда специалиста является актуальной и практически значимой задачей в рамках управления

различными образовательными процессами (проектирования конкурентоспособных образовательных программ и их своевременной актуализации, трудоустройства, профориентации, профессионального самоопределения учащихся и др.), а также в целом в рамках решения проблемы дефицита квалифицированных кадров и управления кадровым потенциалом;

традиционно известные методы мониторинга динамики рынка труда (семинары, круглые столы с работодателями, опросы, анкетирования и т.п.) в эпоху высокоскоростного наращивания знаний и технологий неэффективны;

в рамках цифровой трансформации общества заслуживает внимания идея проектирования и актуализации компетентностной модели востребованного специалиста с использованием методов системного анализа цифровых данных агрегаторов вакансий.

Список литературы

1. Доклад Национального совета при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям «О результатах и направлениях развития Национальной системы квалификаций Российской Федерации» Москва, 2024. [Электронный ресурс] URL: <https://wuz.informio.ru/files/directory/documents/2024/07/mi3i1eeg3wf6zxjmxchek3kk.pdf> (дата обращения: 13.08.2024).

2. Дзюбенко И. Б. Экспоненциальная скорость развития технологий// Научные междисциплинарные исследования. 2020. №6. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksponentsialnaya-skorost-razvitiya-tehnologiy> (дата обращения: 13.08.2024).

3. Требования к дополнительным профессиональным программам (программам профессиональной переподготовки) ИТ-профиля, реализуемым в рамках проекта «Цифровые кафедры» образовательными организациями высшего образования – участниками программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» для получения студентами дополнительной квалификации по ИТ-профилю в рамках федерального проекта «Развитие кадрового потенциала ИТ-отрасли» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». [Электронный ресурс] URL: https://wuz.informio.ru/files/directory/documents/2024/07/01_07_2024_b_n_Afanasev_D_V_Atla.pdf (дата обращения: 13.08.2024).

4. Яковлев Б.С., Шамрин М.Ю., Хасан Х.А. Перспективы развития и проблемы искусственного интеллекта в сферах генерации контента, взаимодействия с человеком и авторским правом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 184-190.

5. Автоматизация и управление производством в машиностроении / О. И. Борискин, С. Н. Ларин, Г. А. Нуждин, М. Г. Нуждин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып.4. С. 544-561.

6. Ларин С. Н., Ноакк Н. В., Соколов Н. А. Конкурентные преимущества развития российской электронной промышленности // Экономика и предпринимательство. 2020. № 1(114). С. 761-766.

7. Логачева О.М. О некоторых примерах внедрения цифровых технологий в преподавании математических дисциплин / О.М. Логачева, А.В. Логачев // Актуальные вопросы образования. 2022. № 3. С. 81-86. EDN CUVRED.

8. Гриншкун В.В., Заславская О.Ю. Развитие цифровых технологий в вузах в условиях вынужденных ограничений: закономерности и следствия // Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании: материалы VI Международной науч. конф. в 3 ч. Ч. 1 / под общ. ред. М.В. Носкова. Красноярск: Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева, 2022. С. 230-234.

9. Российская Федерация. Президент. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 N 309. [Электронный ресурс] URL: <http://metrolog.kodeks.ru/docs08> (дата обращения: 13.08.2024).

10. Стратегия цифровой трансформации отрасли науки и высшего образования. [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/401486011> (дата обращения: 13.08.2024).

11. Bygstad B., Ovrelid E., Ludvigsen S., Daehlen M. From dual digitalization to digital learning space: Exploring the digital transformation of higher education // Computers and Education. 2022. Vol. 182. Arc. 104463

12. Шевчук Е. В., Шпак А. В. Цифровая трансформация управления качеством образовательных бизнес-процессов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. 2023. Т. 20, № 2. С. 159-175.

13. Шишкин А. Д., Шевчук Е. В. Разработка концепции системы поддержки трудоустройства выпускников вуза // Актуальные вопросы образования. 2023. № 1. С. 258-263.

14. Шевчук Е. В., Шишкин А. Д. Автоматизированная система актуализации компетентностных моделей выпускников вуза// Известия Тульского государственного университета. Педагогика. 2024. No 2. С. 85-93.

15. Рейтинг лучших сайтов // similarweb [Электронный ресурс] URL: <https://www.similarweb.com/top-websites/jobs-and-career/jobs-and-employment> (дата обращения: 13.07.2024).

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663194 Российская Федерация. Программа для автоматического сбора и анализа данных вакансий по заданным критериям : № 2024662559: заявл. 05.06.2024: опубл. 05.06.2024 / Е. В. Шевчук, А. Д. Шишкин, А. А. Штепа; заявитель Федеральное государственное бюджет-

ное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий». EDN VZHFUP.

Шевчук Елена Владимировна, канд. техн. наук, доцент, evshevch@mail.ru, Россия, Новосибирск, Сибирский государственный университет геосистем и технологий,

Шишкин Антон Дмитриевич, аспирант, a.shishkin@gym2.nsk.ru, Россия, Новосибирск, Сибирский государственный университет геосистем и технологий,

Петрова Марина Анатольевна, канд. пед. наук, доцент, petrovama13@gmail.com, Россия, Новосибирск, Сибирский государственный университет геосистем и технологий

DIGITAL TRANSFORMATION OF THE PROCESS OF DESIGNING A SPECIALIST'S COMPETENCY MODEL

E.V. Shevchuk, A.D. Shishkin, A.M. Petrova

The shortage of qualified personnel corresponding to the current level of development of science, engineering and technology is recognized as one of the main factors influencing the economic situation. In the modern conditions of high-speed development of technologies and accumulation of knowledge, the solution to the problem of shortage of qualified personnel is to ensure accelerated adaptation of the professional education system to changes in demands and expectations of the labor market, which, in turn, is difficult to implement without solving the problem of continuous monitoring of labor market trends. The authors propose the idea of designing a competency model of a sought-after specialist using the methods of system analysis of data from vacancy aggregators in the context of requirements for professional and personal qualities of applicants. The aim of the study is to improve the methods of increasing the competitiveness of graduates of educational organizations in the context of the digital transformation of society. The result of the study is the digital transformation of the process of designing and updating the competency model of a graduate that meets the modern requirements of employers. The results of the study can be useful for heads of educational programs, HR specialists, students, applicants and employers.

Key words: big data, quality of education, graduate competency model, design of educational programs, systems analysis, employment, digital transformation.

Shevchuk Elena Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, evshevch@mail.ru, Russia, Novosibirsk, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Shishkin Anton Dmitrievich, postgraduate, a.shishkin@gym2.nsk.ru, Russia, Novosibirsk, Siberian State University of Geosystems and Technologies,

Petrova Marina Anatolyevna, candidate of pedagogical sciences, docent, petrovama13@gmail.com, Russia, Novosibirsk, Siberian State University of Geosystems and Technologies, Siberian State University of Geosystems and Technologies

АДАПТАЦИЯ МЕТОДОВ ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПО АНАЛИЗУ ПОВЕДЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Н.Г. Гавриленко, И.А. Заворовский

Рассматривается анализ главных компонент, линейный дискриминантный анализ и метод сверточной нейронной сети, с обоснованием преимущества каждого метода, а также их недостатками, в решение задач по анализу поведения человека. Авторы предлагают комбинировать методы анализа главных компонент, линейного дискриминантного анализа и сверточных нейронных сетей представляющие собой мощный инструмент, который позволяет устранить недостатки каждого из этих методов индивидуально. Данная комбинация обеспечивает более точное и эффективное распознавание образов в различных областях, таких как компьютерное зрение и распознавание поведения человека как в режиме реального времени, так и на видео.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, распознавание образов, общественная безопасность, эксперт, глубокое обучение, поведение человека.

В последние десятилетия распознавание образов стало ключевой областью исследований и технологического развития, вносящую существенный вклад в различные сферы деятельности человека, начиная от компьютерного зрения и медицинской диагностики до автоматизации производства и систем искусственного интеллекта. Эта область охватывает большое число методов и технологий, направленных на разработку систем, способных обнаруживать, классифицировать и интерпретировать образы, получаемые из различных источников.

Суть распознавания образов заключается в обучении компьютерных систем "видеть" и "понимать" визуальные данные, аналогично, как это делает человеческий мозг. Её приложения - от простого определения объектов на изображении до решения сложных задач, таких как распознавание лиц и автоматическая обработка изображений в реальном времени. Данная область может существенно улучшить будущее в сфере обеспечения безопасности и расширить возможности многих индустрий [1].

С развитием глубокого обучения, сверточных нейронных сетей и других передовых методов машинного обучения, область распознавания образов переживает новый виток роста. Эти методы позволяют системам не только извлекать признаки из данных, но и автоматически обучаться на основе опыта, совершенствовать свою производительность и адаптироваться к разнообразным сценариям.

В настоящей статье представлены актуальные тенденции в области распознавания образов, анализируются передовые методы и технологии, предлагается авторское видение развития этой области путём реализации комбинации уже известных методов с дальнейшей их реализацией в виде программного продукта.

Современная научная литература активно исследует и применяет различные методы машинного обучения, включая байесовский классификатор, метод анализа главных компонент (PCA), линейный дискриминантный анализ (LDA) и метод сверточной нейронной сети (CNN). Эти методы широко используются в различных областях, включая компьютерное зрение, медицинскую диагностику, анализ данных и распознавание образов. Они продолжают привлекать внимание исследователей.

Так Байесовский классификатор является мощным алгоритмом в области распознавания образов, предоставляющий эффективный метод для автоматического присвоения объектов к различным категориям. Он основан на статистических принципах и находит широкое применение в таких областях, например, как обработка изображений, биометрия, медицинская диагностика. В своей структуре Байесовский классификатор использует теорему Байеса для оценки вероятности принадлежности объекта к определенному классу на основе известных характеристик. В контексте распознавания образов, этот метод способен учитывать сложные зависимости между признаками и образами, что делает его эффективным средством для анализа и классификации сложных визуальных данных. [3] Байесовский классификатор успешно применяется для задач сегментации объектов, определения образов, а также в задачах распознавания лиц и объектов на изображениях. [3] Его способность моделировать вероятности и адаптироваться к новым данным позволяет эффективно обрабатывать разнообразные визуальные сценарии. Преимущества байесовского классификатора включают высокую точность, особенно при наличии ограниченных данных, и способность обновлять модель при поступлении новой информации. Можно дать некое пояснение по использованию термина распознавания образов в Байесовском классификаторе, а именно, это не просто процесс распознавания картинки или предмета на изображение, это многоуровневая задача, направленная на поэтапное определение того, или иного поведенческого движения человека, направленного на выявления объекта путем его сегментации.

Будущие работы с применением этого метода, могут быть направлены на улучшение его способности работы с неструктурированными данными, учет временных зависимостей и интеграцию с другими методами машинного обучения для создания более комплексных систем распознавания образов. Однако, у этого метода есть свои недостатки и ограничения, которые требуют внимания и критического анализа. Так, Байесовский классификатор имеет тенденцию подчеркивать некоторые предположения об отсутствии зависимости между признаками, что может ограничивать его способность обрабатывать сложные взаимосвязи в данных. В случаях, когда объекты обладают сильной внутренней зависимостью признаков, байесовский классификатор может демонстрировать ограниченную эффективность. Эффективность байесовского классификатора напрямую зависит от корректного определения априорных и условных вероятностей. В случае, если эти вероятности неправильно моделируются или изменяются с

течением времени, производительность классификатора может уменьшаться. Особенно проблематично это в условиях, где структура данных динамична или непостоянна. Байесовский классификатор может демонстрировать неудовлетворительные результаты при работе с несбалансированными данными, когда количество объектов в различных классах значительно отличается. Это связано с тем фактом, что априорные вероятности играют важную роль, и несбалансированные данные могут привести к смещению классификации в пользу часто встречающегося класса. В случае высокоразмерных данных байесовский классификатор может столкнуться с проблемой "проклятия размерности", что может привести к ухудшению производительности и точности, особенно при наличии ограниченного количества обучающих примеров. Хотя байесовский классификатор имеет свои преимущества, важно осознавать его недостатки при выборе метода для конкретной задачи распознавания образов. На практике, в случаях использования метода Байесовского классификатора возникают ряд сложностей с распознаванием, а именно Байесовский классификатор может столкнуться с трудностями в распознавании индивидуальных лиц из-за высокой плотности людей и сложности в выделении признаков для классификации. В местах массового транспорта, таких как метро или автобусы в часы пик, большое количество пассажиров может затруднить распознавание лиц из-за ограниченного пространства и разнообразия поз и лицевых выражений. Также при проведении крупных мероприятий на открытом воздухе, таких как праздники или городские парады, большое количество участников и зрителей может сделать сложным определение и классификацию лиц из-за огромного количества объектов на видеофрагменте.

Еще, одним из немаловажных методов в распознавании образов является анализ главных компонент (РСА), призванный выделить ключевые особенности данных и снизить размерность, сохраняя важную информацию. Этот метод стремится преобразовать исходные признаки в новый набор, так называемые главные компоненты, которые ортогональны друг другу и упорядочены по убыванию дисперсии. Это позволяет сохранить максимальное количество информации в первых компонентах, снижая размерность данных, что позволяет эффективно справляться с проблемой «проклятия размерности», сокращая количество признаков и облегчая анализ. Несмотря на вызовы, РСА остается ценным средством в арсенале методов распознавания образов. Анализ главных компонент предоставляет эффективные механизмы для снижения размерности данных и выделения ключевых признаков. Однако, как и у любого метода, у РСА есть свои недостатки, такие как зависимость между признаками, что делает его неэффективным в обработке данных с нелинейными взаимосвязями. Это может привести к потере важной информации в нелинейных структурах данных. Наблюдается также потеря интерпретируемости, то есть главные компоненты, хотя и содержат максимальное значение дисперсии, часто трудно интерпретировать в исходных признаках. Это создает сложности в объяснении смысла каждой компоненты. К тому же, метод РСА чувствителен к

выбросам в данных, что может исказить результаты и привести к неправильной интерпретации структуры данных. У метода PCA не учитывается сложность структуры данных и контекста, что может сделать его недостаточным для задач, где важны зависимости между признаками. Метод может быть использован для анализа и обработки видео данных, например, для распознавания объектов, лиц и жестов. Предположим, у вас есть видео с изображением разных животных: собаки, кошки, зебры и слонов. Вы пытаетесь применить метод PCA для распознавания и классификации этих животных. Однако PCA может столкнуться с вопросом, когда различия между классами (животными) не максимальны в пространстве главных компонент. Например, если все животные на видео находятся в похожих положениях или освещены одинаково (рис. 1). Этот метод может испытать затруднения в разделении классов и правильной классификации. Таким образом, успех применения PCA к видео зависит от природы данных, их структуры и требуемой задачи распознавания или классификации.

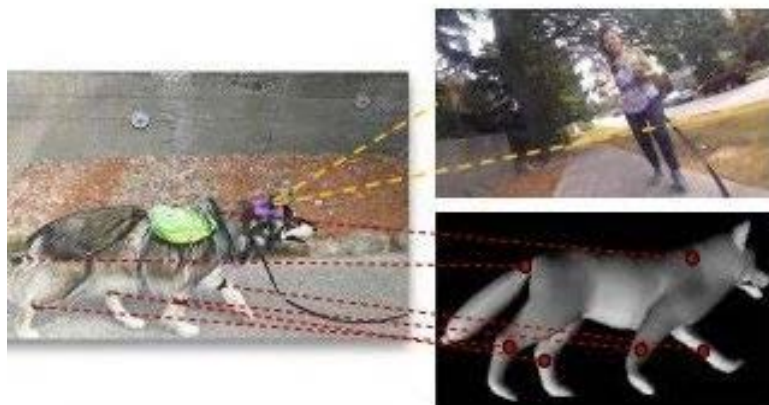


Рис. 1. Метод PCA в распознавание животных

В свою очередь, Линейный дискриминантный анализ (LDA) представляет собой эффективный метод в области распознавания образов, направленный на максимизацию различий между классами данных. Суть метода в том, чтобы максимизировать отношение разброса между классами к разбросу объектов внутри классов. [5] Это достигается путем нахождения такой проекции данных, при которой классы становятся максимально разделимыми. В результате LDA генерирует новые признаки, называемые дискриминантами. Метод обеспечивает эффективную классификацию объектов, особенно в сценариях, где классы имеют ярко выраженные различия между объектами внутри отдельных классов и между ними. Данный метод, может быть использован для сокращения размерности данных, сохраняя при этом максимальное количество информации, необходимой для разделения классов. В отличие от PCA, LDA учитывает корреляции между признаками, что делает его более подходящим для некоторых видов данных. Метод LDA также моделирует структуры и взаимосвязи между классами, что позволяет лучше адаптироваться к специфике задач распознавания образов. Как и любой метод распознавания образов, LDA чувствителен к нелинейным зависимостям в данных. Если данные имеют сложные нели-

нейные структуры, LDA может оказаться менее эффективным, он чувствителен к выбросам в данных. Наличие выбросов может исказить результаты и привести к некорректному обучению модели. Также метод LDA предполагает, что дисперсии внутри каждого класса в среднем равны. В случае, когда дисперсии существенно различаются, производительность LDA может снизиться. При решении задач многоклассовой классификации, LDA может сталкиваться с проблемой эффективного обучения, особенно в случае большого числа классов. В свою очередь, полученные дискриминанты не всегда обладают прямой интерпретируемостью в терминах оригинальных признаков, что может усложнить анализ результатов.

Использование метода Байесовского классификатора и метода анализа главных компонент по отдельности не является достаточным для эффективного решения задач распознавания образов. Метод Байесовского классификатора сталкивается с ограничениями в предположении о независимости признаков и проблемой «проклятия размерности», в то время как РСА может приводить к потере информации о важных особенностях образов из-за линейных преобразований и сжатия данных. Для улучшения производительности распознавания образов авторами предлагается использовать комбинации различных методов и проводить предварительную обработку данных, с помощью разработанного пошагового алгоритма распознавания образов. Однако, при использовании данных методов в распознавании, появляются естественные и искусственные факторы, такие как, при движении людей в большом скоплении. Ни один из представленных методов по отдельности, не может эффективно произвести распознавание, ввиду большой концентрации объектов. При этом влияет также фактор освещенности и скорость движения объектов.

В своих трудах Яне Б. [15] отмечает основной сложностью в распознавании образов ошибочное распознавание при большой концентрации людей. Для решения отмеченной задачи, авторами был разработан и апробирован новый подход. Его суть в комбинации методов. В рамках его реализации предлагается объединить метод LDA с методом РСА, совместив их с методом Байесовского классификатора и глубоким обучением, поддерживаемый архитектурой сверточных нейронных сетей. При его реализации сначала применяется метод РСА для предварительной обработки данных уменьшив, тем самым, размерность и сохранив ключевые признаки. Такой подход призван снизить влияние шума и улучшить общую производительность. В то же время, использовав метод LDA после метода РСА, можно добиться повышения эффективности классификации. После этого метод LDA позволяет выделить дискриминанты, максимизирующие различия между классами, что особенно полезно в задачах с ярко выраженными классовыми различиями. В свою очередь, внедрение байесовского классификатора предоставляет возможность учесть априорные вероятности и обновить модель на основе новых данных. Это особенно важно в динамических сценариях. Таким образом, преимущество сочетания методов позволяет учесть нелинейные зависимости в данных при интеграции

PCA и LDA, тогда как байесовский классификатор способен работать с неструктурированными данными. Метод PCA может уменьшить влияние шума, а LDA и байесовский классификатор обеспечивают улучшение способности к выделению сигналов относительно шума. Байесовский классификатор обеспечит адаптацию к изменениям в данных, что важно в динамических сценариях, а LDA поможет поддерживать высокую разделимость классов. Предложенный подход на основе сочетания методов, может быть применен в обеспечении общественной безопасности при использовании распознавания образов и поведения человека на видео. [15]

Глубокое обучение, поддерживаемое высокой производительностью сверточных нейронных сетей (CNN), стало центральным элементом в преобразовании области распознавания образов. Такие сети представляют собой архитектуры нейронных сетей, оптимизированные для работы с визуальными данными. Они состоят из слоев, специально разработанных для выделения иерархии признаков на изображениях. Сверточные слои применяют фильтры к входным данным, выделяя локальные структуры и позволяя модели извлекать важные признаки. Пулинг-слои уменьшают размерность данных, поддерживая важные признаки и улучшая вычислительную эффективность. Модели обучаются на больших объемах данных с использованием метода обратного распространения ошибки, что позволяет им автоматически извлекать сложные закономерности.

В настоящее время, CNN демонстрируют очень хорошие результаты в задачах детекции и классификации объектов на изображениях. Сверточные нейронные сети успешно применяются для пиксельной сегментации, позволяя выделять и классифицировать каждый элемент изображения. Глубокое обучение с CNN обеспечивает также точное распознавание жестов, движений и поз, что полезно в анализе поведения человека.

Основным преимуществом глубокого обучения с CNN является тот факт, что она способна изучать более абстрактные и сложные признаки, что улучшает их способность к распознаванию различных образов. При этом обучение на разнообразных данных делает модели более адаптивными к различным условиям съемки и сценариям. Способность сверточных слоев извлекать пространственные иерархии признаков, позволяет моделям лучше представлять сложные образы.

В настоящий момент, глубокое обучение, базирующееся на сверточных нейронных сетях, стало ключевым фактором в развитии области распознавания образов. Этот подход открывает новые горизонты в визуальном анализе, предоставляя точные и адаптивные решения для различных задач. Несмотря на ещё существующие сложности, глубокое обучение с CNN остается в центре инноваций в области распознавания образов. формируя будущее визуальных технологий, в связи с этим представим, что у нас есть система видеонаблюдения в общественном месте, таком как вокзал или торговый центр, и мы хотим обнаруживать аномальное поведение, например, оставленные предметы, бегущие люди, длительные остановки и другие подозрительные сценарии.

В условиях динамичного городского окружения обеспечение общественной безопасности становится одним из приоритетных направлений. Технологии распознавания образов в видеопотоках сегодня играют важную роль в создании эффективных систем наблюдения, повышающих уровень безопасности в местах большого скопления людей. Однако, у каждого метода и используемой технологии есть как положительные моменты, так и отрицательные, минимизировать которые можно за счет объединения и взаимодействия методов между собой. Отмеченные выше методы распознавания образов могут быть использованы для выявления необычного или подозрительного поведения, что помогает оперативно реагировать на потенциальные угрозы, а также для точной идентификации индивидов, связанных с преступной деятельностью или разыскиваемых лиц. С использованием этих методов можно анализировать поведение людей в режиме реального времени и выявлять потенциальные угрозы еще до совершения преступления. Эти инновации становятся надежным инструментом для предотвращения преступлений, повышения градуса безопасности и создания комфортной городской среды для всех граждан. В связи с изложенным выше выделим ряд положительных и отрицательных результатов совместного использования метода LDA с методами глубокого обучения в задаче распознавания поведения человека на видео с целью обеспечения общественной безопасности. Они представлены в таблице № 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ результатов использования методов

	Положительные:	Отрицательные:
Линейный дискриминантный анализ	Простота и эффективность	Предполагает линейные зависимости в данных.
	Уменьшает размерность данных, удаляя избыточность.	Подходит для линейно разделимых данных.
	Позволяет интерпретировать важность признаков	Может быть менее эффективен при сложных структурах данных.
Глубокое обучение	Способен извлекать сложные, нелинейные зависимости	Требуется большого объема данных для обучения.
	Сверточные нейронные сети могут автоматически извлекать высокоуровневые признаки	Требуется значительные вычислительные ресурсы.
Сочетание LDA и глубокого обучения	Комбинирование линейных и нелинейных признаков	Требуется внимательной настройки и оптимизации.
	Улучшенная обобщающая способность (Может увеличить способность модели обобщать на новые сценарии)	Потребность в большом объеме данных для обучения.
	Повышение точности распознавания	Усложнение процесса разработки и внедрения

Для минимизации отрицательных характеристик каждого из методов, связанных с ошибками при распознавании образов из-за выделенных ошибок, путём использования программы, которая планируется в среде Python, попробуем оценить возможность минимизации недочетов и коллизий

в вопросах распознавания поведения человека на видео. Для устранения выявленных недочетов, планируется использовать среду программирования Python. Планируется подключить готовые библиотеки распознавания на основе нейронных сетей «scikit-learn» для LDA и «tensorflow» для глубокого обучения на базе сверточной нейронной сети. Далее в процессе реализации, разобьем задачи распознавания образов на шаги, выходным результатом будет, программный продукт способный распознавать объекты и их девиантное поведение по разработанной нами градационной шкале.

Шаг 1: Получение видеоданных: захватывается видеопоток с камер наблюдения в реальном времени.

Шаг 2: Предобработка видеоданных: выполняется предварительная обработка видеоданных, а именно - определяется область на видео, лиц осуществляющих движение покадрово, тем самым предоставляется возможность количественно определить масштаб распознавания; выделяются люди, отслеживается их движения и приведение к стандартизированному формату, проанализировав количество людей в покадровом видео, можно будет записать в файл количество людей через определённый интервал времени на выделенную область. Выбор архитектуры напрямую зависит от обрабатываемого видео, если высокого разрешение видео и силуэт людей четко распознаваем, то можно применять архитектуру нейронной сети «yolov3 - tiny».

Шаг 3: Извлечение признаков с помощью LDA: применяем LDA для извлечения линейных комбинаций признаков, которые наилучшим образом разделяют классы допустимого и аномального поведения. Можно использовать, например, координаты движения, скорость, направление и другие характеристики.

Шаг 4: Применение глубокого обучения для извлечения высокоуровневых признаков: обучаем глубокую нейронную сеть (например, рекуррентную нейронную сеть или сверточную нейронную сеть) на последовательности видеок кадров для извлечения более сложных пространственно-временных признаков.

Шаг 5: Обучение комбинированной модели: объединяем результаты LDA и высокоуровневых признаков из глубокого обучения. можно использовать многоклассовую классификацию или обучение с учителем для аномалий.

Шаг 6: Обнаружение аномалий: после обучения модели на данных обычного поведения, система может автоматически обнаруживать аномалии на видео, выделяя сцены или моменты, несоответствующие обычному паттерну поведения.

Шаг 7: Выделение некоего значения от 0 до 1, в котором 0 соответствует значению спокойного поведения, значение 1 соответствует значению аномального (девиантного) поведения объекта. Чем значение ближе к 1, тем более аномальным считается поведение.

Мы предлагаем метод, который может обнаруживать специфические формы поведения людей, такие как бег и встречи, даже в многолюд-

ных кадрах. Несмотря на то, что отслеживание каждого объекта, на котором находятся люди, является сложной задачей, можно было бы определить конкретное поведение человека путем поиска определенного уникального значения признака из основных нормальных значений признаков. Мы использовали траекторию движущегося человека, потому что она содержит много информации о поведении человека, такой как скорость или пройденное расстояние. Основной проблемой в технологии распознавания поведения человека при использовании стандартных методов заключалась в том, что они не могут распознавать поведение человека на основе его траектории в группах людей, там, где очень большая активность и большой трафик. Так, в тестовом варианте применения нашего алгоритма, нам удалось достичь результата выделения объектов и описания их поведения, путем анализа их позы на снимке и манеры передвижения, с результатом их возможного нетривиального поведения от 0 до 1. (рис. 2.) Наш алгоритм распознал объекты на кадре, как мы можем видеть, объекты которые находятся в пред недвижимом состоянии, имеют значение близкое к «0», а объекты которые идут в ускоренном темпе, тем самым развили скорость и показывают свое некое отклонение от нормального значения, имеют показатель близкий к «1».

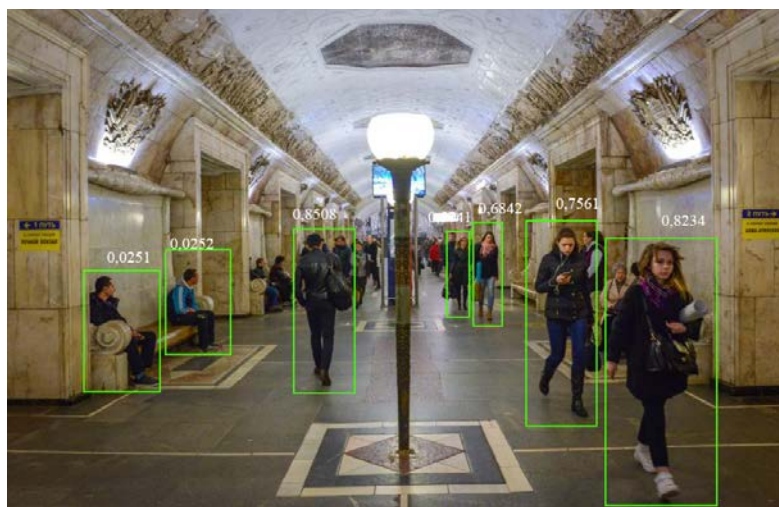


Рис. 2. Выделение объектов и характера их передвижения

Реализовав с помощью предложенного метода LDA с методами глубокого обучения на практике, в качестве вспомогательного инструмента распознавания поведения человека на видео, мы смогли выделить ряд положительных моментов:

1. Нам удастся повысить эффективность извлечения высокоуровневых признаков из видеоданных, путем покадрового разделения видеоданных.
2. Путем выделения типовых манер поведения людей, получится автоматически выделять различные шаблоны поведения, от простых движений до более сложных действий, таким образом получится сократить время обработки распознавания движения.

3. Комбинация LDA с методами глубокого обучения поможет привести к улучшению точности классификации поведения человека на видео. Это связано с тем, что LDA помогает выделить наиболее информативные признаки из выходов глубоких нейронных сетей.

4. Комбинация LDA с глубоким обучением позволит создать модель, адаптированную к различным сценариям поведения, обеспечив высокую степень гибкости и способность работать с разнообразными данными.

Таким образом, наш алгоритм может определять специфическое поведение путем анализа сходства каждого конкретного поведения с эталонной траекторией в пространстве признаков траектории. Десятимерные объекты были извлечены из траектории с помощью PCA, чтобы создать пространство объектов. Благодаря пространству признаков предложенный нами метод, сможет чувствительно обнаруживать конкретное поведение на основе небольшого количества данных. Большинство этих так называемых ложных обнаружений отклоняются процессом проверки. Преимущества нашего подхода, заключается в том, что есть возможность учесть как линейные зависимости, извлеченные LDA, так и сложные пространственно-временные зависимости, извлеченные глубоким обучением. Комбинирование методов увеличивает способность модели к обобщению на различные сценарии аномального поведения. Система сможет обучаться на данных обычного поведения и автоматически обнаруживать аномалии без необходимости ручной настройки.

Приведенная интеграция демонстрирует, как комбинированный подход с использованием LDA и глубокого обучения сможет повысить эффективность в задаче распознавания аномального поведения на видео. Такая система может быть важным элементом в системах обеспечения общественной безопасности и видеонаблюдения.

В конечном итоге, выбор между LDA, глубоким обучением или их комбинацией зависит от конкретных потребностей, объема данных и доступности ресурсов. С учетом экспертной оценки можно принять информированное решение о выборе метода или их сочетании для конкретной задачи распознавания поведения человека на видео. В последнее десятилетие распознавание поведения человека на видео стало важным направлением исследований, обеспечивая продвинутые системы безопасности и интеллектуальные технологии. Эксперты выделяют, что сценарии в реальной жизни могут быть чрезвычайно разнообразными. Комбинированный подход обеспечивает необходимую гибкость для адаптации к различным условиям, что часто бывает сложно для одиночных методов. Эксперты компании NTechLab отмечают, что LDA может быть эффективным в выделении ключевых признаков и снижении размерности данных. Этот метод полезен для предварительной обработки видеоданных и выделения важных характеристик. Глубокие нейронные сети считаются мощным инструментом для моделирования сложных пространственных и временных зависимостей в данных. Яне Б. подчеркивает, что использование глубокого обучения дополняет анализ, обогащая его контекстом. [15] Эксперименты

с реальными видеоданными показывают, что комбинированный метод, включая LDA и глубокое обучение, превосходит по точности и эффективности использование отдельных методов. Этот вывод подкреплен результатами, демонстрирующими превосходство комбинации при решении разнообразных задач. Яне Б. обсуждает важность повышения робастности системы распознавания поведения. Комбинированный подход позволяет создавать более устойчивые системы, способные успешно справляться с динамичностью сценариев. [15]

Комбинация метода LDA с методами глубокого обучения в распознавании поведения человека на видео представляет собой мощный и перспективный подход, который может привести к значительному улучшению точности и интерпретируемости моделей. Использование глубокого обучения позволяет эффективно извлекать сложные признаки из видеоданных, что особенно важно для выделения характерных образов поведения. Глубокие нейронные сети могут обучаться на больших объемах данных и автоматически выявлять различные шаблоны поведения, что делает их мощным инструментом для распознавания сложных сценариев. Однако глубокое обучение имеет свои ограничения, такие как склонность к переобучению и сложность интерпретации результатов. В этом контексте LDA может стать ценным дополнением, позволяя уменьшить размерность данных и выделить наиболее информативные признаки. Благодаря своей интерпретируемости LDA позволяет лучше понять, какие аспекты поведения оказывают наибольшее влияние на классификацию.

Комбинирование этих двух методов позволяет совместить преимущества глубокого обучения и LDA. Глубокие нейронные сети выделяют сложные шаблоны поведения, в то время как LDA улучшает обобщающую способность модели, что делает ее менее склонной к переобучению и позволяет лучше понять причины классификации. Однако, несмотря на перспективы, существуют вызовы, требующие внимательного рассмотрения. Требования к вычислительным ресурсам, необходимость обучения на больших объемах данных и настройка гиперпараметров могут представлять собой значительные задачи в практической реализации. Гибкость, предоставляемая комбинированным подходом, а также синергия между методами, делают его предпочтительным решением в разнообразных условиях. Эксперты, анализировавшие наш алгоритм, выражают уверенность в том, что такой подход способствует более точному, эффективному и надежному анализу поведения человека, что является важным элементом в сфере безопасности, видеонаблюдения и психологических исследований.

В целом, использование совмещенного метода LDA и глубокого обучения в распознавании поведения человека на видео представляет собой перспективное решение, способное повысить эффективность систем видеомониторинга и безопасности. Это также подчеркивает важность интеграции различных методологий для создания более надежных и точных систем распознавания поведения на основе видеоаналитики.

Список литературы

1. Sochman J. AdaBoost with totally corrective updates for fast face detection [Electronic resource] / J. Sochman, J. Matas // Center for Machine Perception, Czech Technical University, Prague.
2. Viola P., Jones M. Robust Real-Time Object Detection: tech. report. Cambridge. 2021. 320 p.
3. Воронцов К.В. Комбинаторные оценки качества обучения по прецедентам // Доклады РАН. 2004. Т. 394. №2. С. 175-178.
4. Галеев С.Ф. Модификация алгоритма Виолы-Джонса для распознавания лиц в режиме реального времени // Современная техника и технологии. 2017. No 5. [Электронный ресурс] URL: <http://technology.snauka.ru/2017/05/13529> (дата обращения: 10.06.2024).
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2015. 1007 с.
6. Заенцев И.В. Нейронные сети. Основные модели. Воронеж: ВГУ, 1999. 76 с.
7. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия - Телеком, 2022. 382 с.
8. Мерков А.Б. Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения. М.: Едиториал УРСС. 2011. Т. 256.
9. Мокшин В.В. и др. Распознавание образов транспортных средств на основе эвристических данных и машинного обучения // Вестник Казанского технологического университета. 2022. Т. 19. №. 5.
10. Таранян А.Р. Обучение классификатора Виолы-Джонса для локализации автомобильных номерных знаков // Молодежный научно-технический вестник. 2014. No 11. [Электронный ресурс] URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/739653.html> (дата обращения: 10.06.2024).
11. Дж. Ту, Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1978. 412 с.
12. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2016. 752 с.
13. Шурыгин А.М. Прикладная стохастика: робастность, оценивание, прогноз. М.: Финансы и статистика, 2020.
14. Южаков Г. Расширенный набор характеристик Хаара // Научное сообщество GraphiCon. [Электронный ресурс] URL: <http://www.graphicon.ru/html/2012/conference/RU2%20-%20Visi/gc2012yuzhakov.pdf> (дата обращения: 13.03.2024).
15. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2017. 584 с.

Гавриленко Наталья Геннадьевна, д-р экон. наук, профессор, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,

Заворовский Иван Алексеевич, аспирант, navi-27@yandex.ru, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

ADAPTATION OF PATTERN RECOGNITION THEORY METHODS IN SOLVING
PROBLEMS OF HUMAN BEHAVIOR ANALYSIS

N.G. Gavrilenko, I.A. Zavorovsky

The article discusses principal component analysis, linear discriminant analysis, and the convolutional neural network method, with a rationale for the advantages of each method, as well as their disadvantages, in solving problems of human behavior analysis. The authors propose combining the methods of principal component analysis, linear discriminant analysis, and convolutional neural networks, which are a powerful tool that allows you to eliminate the disadvantages of each of these methods individually. This combination provides more accurate and effective pattern recognition in various fields, such as computer vision and human behavior recognition both in real time and on video.

Key words: artificial intelligence, machine learning, pattern recognition, public safety, expert, deep learning, human behavior.

Gavrilenko Natalia Gennadyevna, doctor of economics sciences, professor, Russia, Omsk, Siberian State Automobile and Highway University,

Zavorovsky Ivan Alekseevich, postgraduate, navi-27@yandex.ru, Russian Federation, Omsk, Siberian State Automobile and Road University

УДК 535.346.1:681.7

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-201-202

**ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТИЧНО КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИРОВОЧНОГО МАТЕРИАЛА
ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Е.Е. Майоров, В.В. Курлов, А.В. Арёфьев, В.П. Пушкина

Работа посвящена применению частично когерентного излучения в исследовании материалов для полировки оптических поверхностей. В оптическом приборостроении этот метод позволяет оценить не только гладкость поверхностей, качество полировки материала, но и определить уровень износа рабочих поверхностей устройств для обработки оптических изделий, поэтому работа актуальна и перспективна. В работе поставлена цель, задача исследования и определены метод и объект исследования. Приведены внешние виды измерительной установки, измеряемых поверхностей, а также полировочного устройства оптических поверхностей. Получены микрорельефы исследуемых поверхностей и результаты измерений расстояния до поверхности при движении в направлении оси ОХ и ОУ. Подтверждено, что отличия микрорельефов поверхностей незначительны, поэтому данные поверхности целесообразно использовать для полировки оптических деталей.

Ключевые слова: оптическая поверхность, интерферометрия, полиэтилентерефталата, металлический щуп, фотоприёмный блок, опорное зеркало, ветви интерферометра.

Развитие методов и технических средств оптического контроля с необходимостью обуславливает совершенствование оптико-физических

направлений в научных исследованиях [1, 2]. Одно из таких направлений – интерферометрия, которая занимает ключевое место в методах оптических измерений за счет высокой чувствительности, точности измерений и большого диапазона измеряемых величин [3, 4].

Интерференционные методы и средства используются в разных областях науки и техники: химии, биологии, физики, медицине, а также в разных средствах телекоммуникаций и т.д. [5, 6]. Данные методы пришли на смену в некоторых направлениях традиционным физико-химическим методам, так как позволяют исследовать свойства объектов и процессов без материальных контактов с предметом, получать данные в количественном и качественном виде, не предъявляют строгих требований к качеству изучаемой среды, пригодны для статистических и динамических измерений в реальном времени [7, 8].

Появление новых источников света, обладающих когерентностью в пределах длины когерентности, с определенными мощностями и имеющим узкий спектральный диапазон, дало толчок к созданию новых подходов в интерференционных измерениях применительно к объектам и средам разного агрегатного состояния [9, 10]. Поэтому в интерферометрии можно выделить отдельное направление приборов и комплексов, работа которых основана на изучении отраженного частично когерентного излучения от исследуемого материала – частично когерентные интерференционные приборы и комплексы (ЧКИП и К) [11, 12]. ЧКИП и К имеют высокотехнологичные материалы, которые используются в оптических системах, что позволяет проводить высокоточные измерения сверхмалых смещений, определять оптические параметры тонких плёнок, оптически мутных сред, диффузно рассеивающих объектов. Изучать оптические, акустические, диффузные и т.д. процессы [13, 14].

Анализ научной литературы показал, что интерферометры использующие источники излучения с малой временной или пространственной когерентностью перспективны и актуальны в оптическом приборостроении. ЧКИП и К имеют ряд преимуществ не только над аналогами геометрической оптики, но и над классическими интерференционными методами и средствами, а именно: измеряют шероховатые поверхности, оптически мутные среды, а также динамику деформации поверхности и т.д. ЧКИП и К имеют высокую точность измерений (от 10 мкм до 0,01 мкм), большой диапазон измеряемых величин (от 0 до 6 мм), малогабаритны и просты в эксплуатации [15-20].

Многие исследователи добились определенных успехов в функционировании ЧКИП и К, применяя компьютерные технологии. Получили хорошие результаты теоретического характера, используя современные цифровые фотоприёмники. Наблюдается прорыв в практическом использовании, в частности, медицине, биологии: исследуются формы эритроцитов, влияние внешних агентов в подповерхностных слоях на кожный покров, а также в офтальмологии.

Наблюдается тенденция применения частично когерентного излучения для исследования сложных форм поверхностей, а также для кон-

троля рабочих поверхностей полировочных материалов для линзовой и зеркальной оптики [19, 20]. В оптическом приборостроении этот подход позволяет оценить не только гладкость поверхностей и качество полировки материала, но и определить уровень износа рабочих поверхностей инструмента. Для эффективного и последовательного применения полировальных машин, приборов на каждом этапе необходимо контролировать шероховатость поверхности рабочей части материала. Всё чаще и чаще исследователи задаются следующими вопросами: о сохранности полировочной способности материала из полиэтилентерефталата, импрегнированного алмазным порошком в сочетании с оксидом алюминия с учетом их повторного применения после многократного использования (1000 раз), об отличии микрорельефа поверхности нового и использованного и т.д.

Поэтому может представлять интерес исследование рабочей поверхности полировочного материала для линзовой оптики до и после применения с помощью частично когерентного излучения интерференционного устройства.

Получение результатов измерений микрорельефа, распределение коэффициента отражения по поверхности материала экспериментальной интерферометрической установкой и определило цель настоящей работы.

Постановка задачи. С помощью частично когерентного излучения интерференционной установки провести измерения микрорельефа поверхности нового и использованного материала при линейном перемещении поверхности рабочей части по оси ОХ, ОУ, с шагом 10 мкм относительно светового луча. Контроль поверхности осуществлять при нормальном падении светового пучка на поверхность.

Метод и объекты исследования. В качестве объектов исследования использовали рабочие поверхности полировочного материала, изготовленного из полиэтилентерефталата, импрегнированного алмазным порошком и оксидом алюминия для полировки линзовой оптики. Образцы были в виде четырехугольных пленок со сторонами 20 мм и 10 мм. Объекты имели серый цвет (рис. 1).

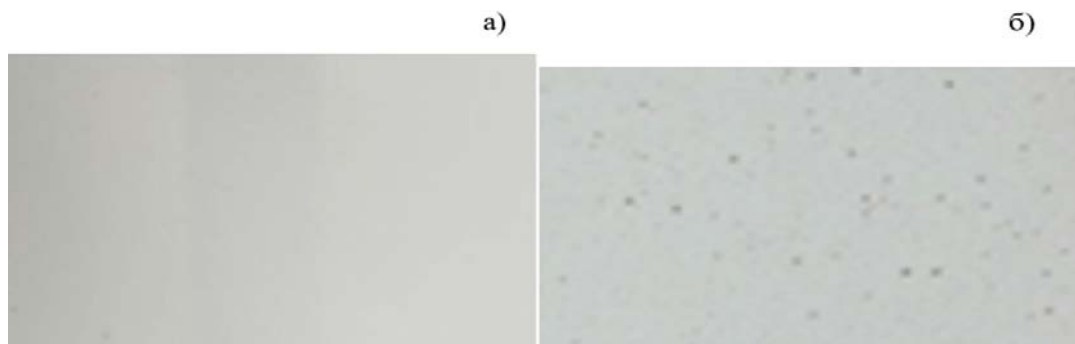


Рис. 1 Внешний вид исследуемых поверхностей материалов: а – новая поверхность; б – поверхность после 1000 раз использования

Данные объекты крепятся на металлический щуп для полировки оптической поверхности (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид полировочного устройства оптических поверхностей: 1 – металлический щуп; 2 – исследуемый объект; 3 – оптическая поверхность

Для проведения экспериментальных исследований использовалась измерительная установка квазиодномодового волоконного интерферометра Майкельсона с полупроводниковым суперлюминесцентным светодиодом на базе InGaN с пиковой длиной волны $\lambda_{\text{max}} = 380$ нм, длиной когерентности $l_c = 10$ мкм, шириной спектра $\Delta\lambda = 14$ нм и мощностью излучения $P = 1$ мВт, функциональная схема которой приведена на рисунке 3.

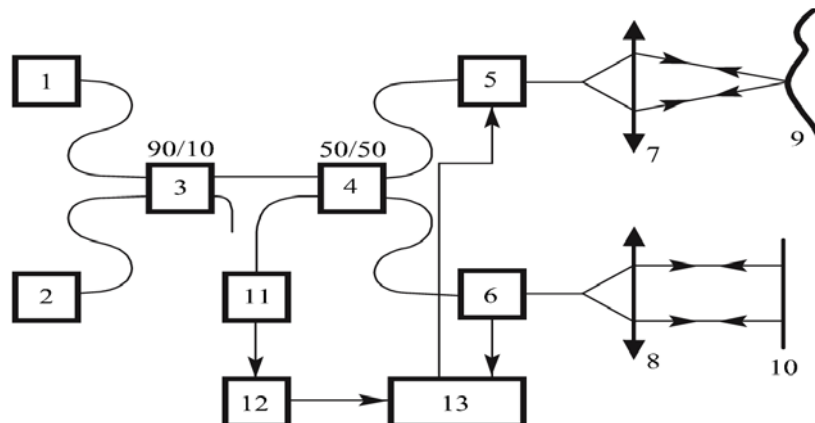


Рис. 3 Функциональная схема измерительного устройства: 1, 2 – источники излучения; 3, 4 – волоконно-оптические ответвители; 5, 6 – устройства смещений; 7, 8 – микрообъективы; 9 – исследуемая поверхность; 10 – плоское зеркало; 11 – фотокамера; 12 – электронный блок обработки; 13 – компьютер

Микрообъективы используемые в установке ($10^{\times}$, $f = 18$ мм, $A = 0,2$) служили для фокусировки светового пучка на поверхность материала и зеркала находящееся в опорной ветви интерферометра.

Информация о поверхности исследуемого образца извлекается с помощью специального программного обеспечения.

Технические характеристики:

– погрешность – 10 мкм;

- пределы перемещения исследуемого объекта по 2-м осям, мм – ± 2 ;
- фотоприёмный блок – фотокамера «Canon»;
- источник частично когерентного света – суперлюминисцентный светодиод;
- длина волны излучения, мкм – 0,38
- расстояние до измеряемой поверхности – 30 мм

Экспериментальные результаты и их обсуждение. При контроле измеряемой поверхности в опорной ветви интерферометра изменялась оптическая разность хода за счет движения опорного зеркала. Опорное зеркало приводилось в движение посредством электромагнитного механизма. Максимальный сигнал в фотоприёмном блоке регистрировался при максимуме контраста интерференционной картины, что соответствовало равенству оптических длин в ветвях интерферометра. В установке реализовано техническое решение, которое позволило постоянно фокусировать световой пучок на поверхности при движении опорного зеркала. Пространственное положение светодиода изменялось во времени вдоль оси распространяющегося излучения с частотой перемещения опорного зеркала. Отношение амплитуд перемещения светодиода и опорного зеркала составляло 1:50.

Во избежание каких-либо смещений измеряемой поверхности при динамических измерениях необходимо обеспечить независимость измерений. Ввод плоскопараллельной пластины, которая крепилась к измеряемой поверхности обеспечивал эту независимость. Именно эта поверхность пластины была базовой поверхностью отсчета, а измеряемая величина – зазор между двумя поверхностями. Для графического представления результатов применялась специально написанная программа.

На рисунке 4 представлены результаты измерений микрорельефа поверхностей.

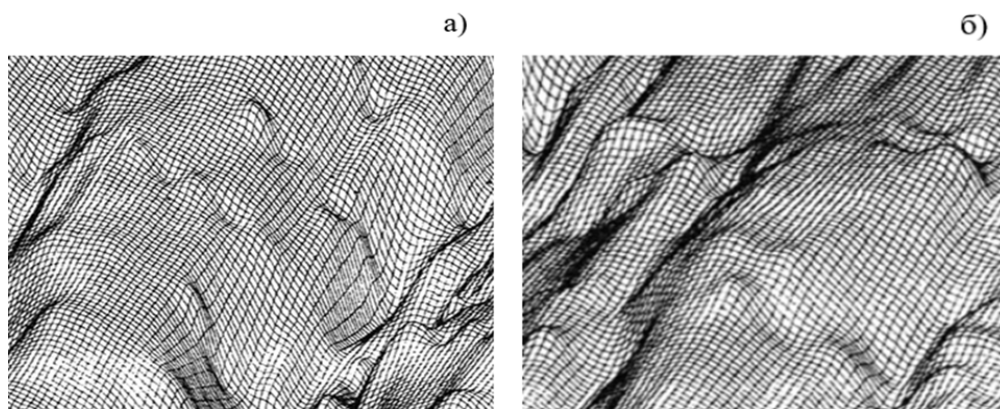


Рис. 4. Микрорельеф исследуемых поверхностей: а – поверхность нового материала; б – поверхность после 1000 раз использования

В процессе экспериментальных исследований фиксировались результаты измерений расстояния до поверхности материала. Контролирова-

лись две поверхности: новая и после 1000 раз использования. Анализировался фрагмент поверхности размерами 200 мкм х 200 мкм.

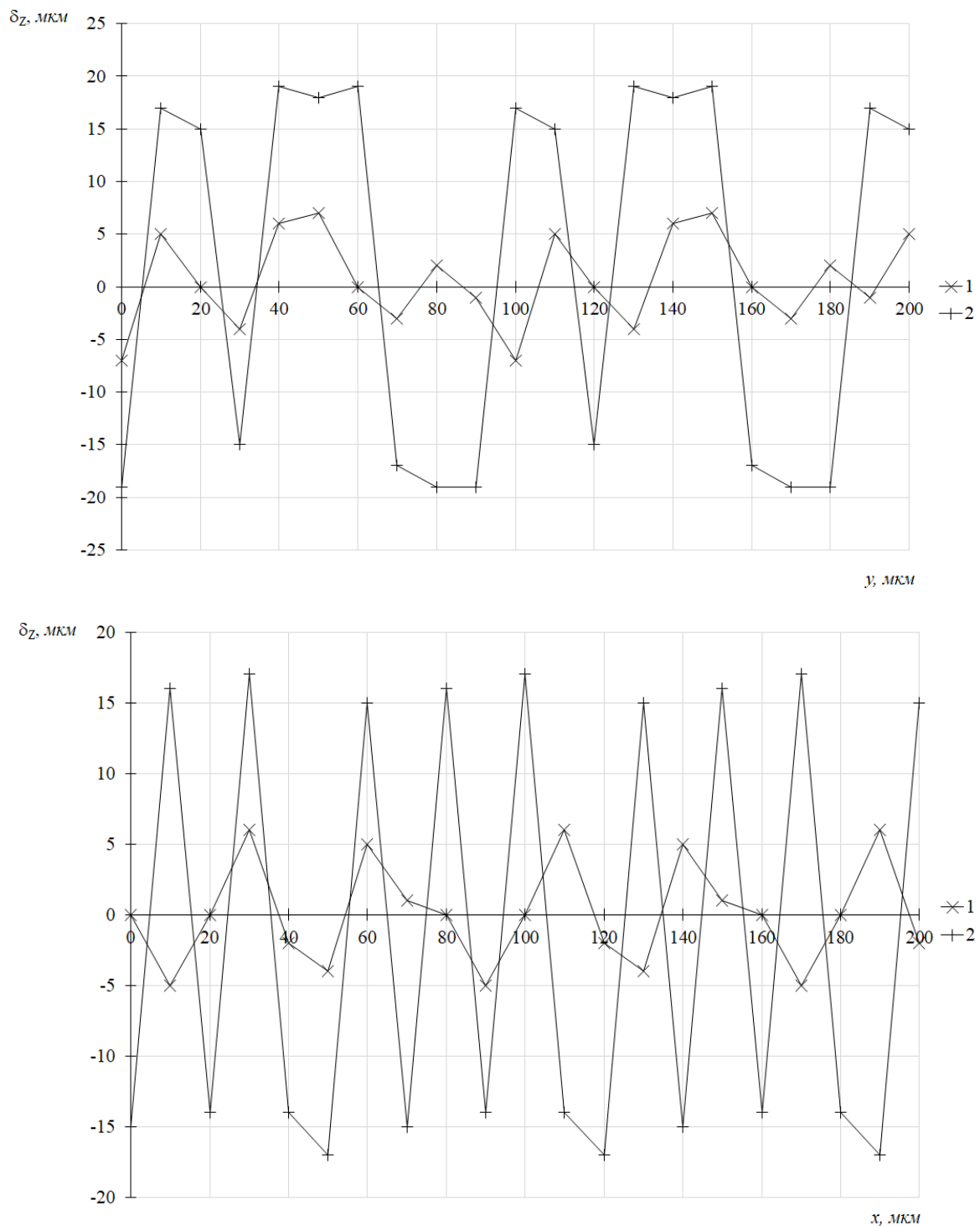


Рис. 5. Результаты измерений расстояния до поверхностей:
1 – до поверхности нового материала; 2 – до поверхности материала,
использованного 1000 раз

На рисунке 5 приведены результаты измерений в направлении ОХ и ОУ.

Поверхности ориентировались относительно светового пучка под углом $\theta = 0$ и для каждой точки поверхности производилось 50 измерений при перемещении поверхности в направлении ОХ и ОУ. Материалы фиксировались на микрометрическом столе и перемещение их осуществлялось относительно светового пучка с шагом 10 мкм. Эксперимент показал, что для поверхности нового материала результаты измерений расстояния до поверхности при движении в направлении оси ОХ и ОУ находятся на уровне от 0 мкм до 7 мкм, а для поверхности, использованной 1000 раз – в диапазоне от 14 мкм до 19 мкм. Из рисунка 5 видно, что отличия микрорельефа незначительны, поэтому данные поверхности целесообразно использовать для полировки оптических деталей.

Заключение. В данной работе показана возможность контроля микрорельефа поверхности экспериментальной интерференционной установкой. Получены флуктуации результатов измерений расстояния до объекта. Представленные результаты измерений доказывают, что после 1000 раз использования поверхности из полиэтилентерефталата, импрегнированного алмазным порошком и оксидом алюминия возможно применять для грубой обработки линзовой оптики. Полученные данные могут заинтересовать производителей рассмотренного материала.

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). pp. 197-200.
3. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.В. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. Л: Лениздат, 1887. 294 с.
4. Малакара Д. Оптический производственный контроль: пер. с англ. под ред. Соснова А.Н. М.: Машиностроение. 1985. 340 с.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение. 1987. 264 с.
6. Kyeong-Hee Lee, N.B.Voznesensky, V.K.Kirillovsky. Principle of certification of high precision optical parts and systems based on diffraction interferometer. Proceedings of The First Scientific Workshop-Presentation «Optical Micro- and Nanotechnologies (OmaN-1)». 17-18 June 2002. С. 32-40.
7. Духопел И.И., Федина Л.Г. Интерференционные методы и приборы для контроля правильности формы сферических поверхностей // ОМП. 1973. №8. С. 50 – 55.
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., Ушверидзе Л.А. Оптимизация динамических параметров оптического щупа триггерного типа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. №2 (78). С. 13-16.
12. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А. Расчет параметров сканирования интерферометрической системы контроля формы диффузно отражающих объектов // Приборы. 2012. №7 (145). С.23-25.
13. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение.1983. 231 с.
14. Майоров Е.Е., Костин Г.А., Курлов В.В., Баранов Н.Е. Исследование динамической поверхности летательного аппарата интерференционным методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 8. С. 722–726. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726.
15. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение. 2013. том 23. №2, С.38-46.
16. Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Пушкина В. П., Дагаев А. В. Исследование низкокогерентного интерферометрического зонда, при работе в сканирующем режиме измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 790–797. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-790-797.
17. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А. Разработка компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Приборы. 2015. №11 (185). С.26-31.
18. Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров А.Г., Черняк Т.А. Оптико-электронный прибор для контроля геометрических параметров диффузно отражающих объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 388-394.
19. 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.
20. Майоров Е.Е., Бородянский Ю.М., Гулиев Р.Б., Дагаев А.В., Таюрская И.С. Микроинтерференционные исследования деформированной поверхности при наклонном падении светового пятна // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 12. С. 146-151. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-12-145-146.

Майоров Евгений Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, majorov_ee@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Курлов Виктор Валентинович, канд. техн. наук, доцент, vitek543@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Арефьев Александр Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доцент, aaref@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Пушкина Вера Павловна, канд. экон. наук, доцент, vera150465@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

THE USE OF PARTIALLY COHERENT RADIATION IN AN INTERFERENCE DEVICE FOR MONITORING THE WORKING SURFACE OF THE POLISHING MATERIAL OF OPTICAL PRODUCTS

E.E. Maiorov, V.V. Kurlov, A.V. Arefiev, V.P. Pushkina

The work to the application of partially coherent radiation in the study of materials for polishing optical surfaces is devoted. In optical instrumentation, this method allows us to evaluate not only the smoothness of surfaces, the quality of polishing the material, but also to determine the level of wear on the working surfaces of devices for processing optical products, so the work is relevant and promising. The paper sets the goal, the task of the study, and defines the method and object of the study. The external views of the measuring unit, the measured surfaces, as well as the polishing device of optical surfaces are given. Microreliefs of the studied surfaces and the results of measurements of the distance to the surface when moving in the direction of the OX and OY axes were obtained. It is confirmed that the differences in the microreliefs of the surfaces are insignificant, therefore it is advisable to use these surfaces for polishing optical parts.

Key words: optical surface, interferometry, polyethylene terephthalate, metal probe, photodetector unit, reference mirror, interferometer branches.

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@rambler.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Arefiev Alexander Vladimirovich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, aaref@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Pushkina Vera Pavlovna, candidate of economic sciences, docent, vera150465@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТИЧНО КОГЕРЕНТНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ЗОНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАБОТАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

Е.Е. Майоров, В.А. Голубков, Р.Б. Гулиев, А.В. Дагаев

Работа посвящена использованию частично когерентного интерференционного зонда для измерения микрорельефа поверхности обработанных керамических пластин. В оптическом приборостроении этот метод позволяет оценить не только гладкость поверхностей, качество полировки материала, но и определить уровень износа рабочих поверхностей устройств для обработки оптических изделий и определить поверхностные микродефекты, поэтому работа актуальна и перспективна. В работе поставлена цель, задача исследования и определены метод и объект исследования. Приведена функциональная схема измерительного зонда. Получены микрорельефы исследуемых поверхностей и результаты измерений расстояния до поверхности при движении в направлении оси ОХ и ОУ. Представленные результаты измерений поверхностей при отсутствии и наличии поверхностных микродефектов.

Ключевые слова: измеряемая поверхность, интерферометрия, керамическая пластина, интерференционный щуп, фотоприёмный блок, опорное зеркало, ветви интерферометра.

Развитие методов и технических средств оптического контроля с необходимостью обуславливает совершенствование оптико-физических направлений в научных исследованиях [1, 2]. Одно из таких направлений – интерферометрия, которая занимает ключевое место в методах оптических измерений за счет высокой чувствительности, точности измерений и большого диапазона измеряемых величин [3, 4].

Интерференционные методы и средства используются в разных областях науки и техники: химии, биологии, физики, медицине, а также в разных средствах телекоммуникаций и т.д. [5, 6]. Данные методы пришли на смену в некоторых направлениях традиционным физико-химическим методам, так как позволяют исследовать свойства объектов и процессов без материальных контактов с предметом, получать данные в количественном и качественном виде, не предъявляют строгих требований к качеству изучаемой среды, пригодны для статистических и динамических измерений в реальном времени [7, 8].

Появление новых источников света, обладающих когерентностью в пределах длины когерентности, с определенными мощностями и имеющим узкий спектральный диапазон, дало толчок к созданию новых подходов в интерференционных измерениях применительно к объектам и средам разного агрегатного состояния [9, 10]. Поэтому в интерферометрии можно выделить отдельное направление приборов и комплексов, работа которых основана на изучении отраженного частично когерентного излучения от исследуемого материала – частично когерентные интерференционные

приборы и комплексы (ЧКИП и К) [11, 12]. ЧКИП и К имеют высокотехнологичные материалы, которые используются в оптических системах, что позволяет проводить высокоточные измерения сверхмалых смещений, определять оптические параметры тонких плёнок, оптически мутных сред, диффузно рассеивающих объектов. Изучать оптические, акустические, диффузные и т.д. процессы [13, 14].

Анализ научной литературы показал, что интерферометры использующие источники излучения с малой временной или пространственной когерентностью перспективны и актуальны в оптическом приборостроении. ЧКИП и К имеют ряд преимуществ не только над аналогами геометрической оптики, но и над классическими интерференционными методами и средствами, а именно: измеряют шероховатые поверхности, оптически мутные среды, а также динамику деформации поверхности и т.д. ЧКИП и К имеют высокую точность измерений (от 10 мкм до 0,01 мкм), большой диапазон измеряемых величин (от 0 до 6 мм), малогабаритны и просты в эксплуатации [15-20].

Многие исследователи добились определенных успехов в функционировании ЧКИП и К, применяя компьютерные технологии. Получили хорошие результаты теоретического характера, используя современные цифровые фотоприёмники. Наблюдается прорыв в практическом использовании, в частности, медицине, биологии: исследуются формы эритроцитов, влияние внешних агентов в подповерхностных слоях на кожный покров, а также в офтальмологии.

Наблюдается тенденция применения частично когерентного излучения для исследования сложных форм поверхностей, а также для контроля рабочих поверхностей полировочных материалов для линзовой и зеркальной оптики. В оптическом приборостроении этот подход позволяет оценить не только гладкость поверхностей и качество полировки материала, но и определить уровень износа рабочих поверхностей инструмента. Для эффективного и последовательного применения полировальных машин, приборов на каждом этапе необходимо контролировать шероховатость поверхности рабочей части материала [19, 20]. В настоящее время исследователей интересуют вопросы связанные с чистотой поверхности элементов микроэлектроники, в частности, керамических пластин, используемых в разных радиотехнических приборах.

Поэтому представляет интерес исследование геометрии поверхности керамических образцов экспериментальным частично когерентным интерференционным зондом.

Получение данных об микрорельефе поверхности керамических пластин посредством частично когерентного излучения и определило цель настоящей работы.

Постановка задачи. С помощью экспериментальной измерительной установки провести измерения микрорельефа поверхности керамических пластин при линейном перемещении поверхности по оси ОХ и ОУ, с шагом 10 мкм относительно светового луча. Контроль поверхности осуществлять при нормальном падении светового пучка на поверхность.

Материалы и метод исследования. В качестве объектов исследования использовали поверхности керамических пластин размером 5 мм × 5 мм, которые применяются в микроэлектронике. Образцы были предоставлены заводом-производителем микроэлектронных компонент. Одна из пластин имела поверхностные дефекты, плохо различимые для визуального восприятия. Важным вопросом для производителя являлся вопрос чистоты поверхности керамических пластин.

Для измерений поверхностей использовалась экспериментальная интерферометрическая установка, реализованная по схеме интерферометра Майкельсона, где в качестве источника излучения использовался светодиод белого света. Функциональная схема представлена на рисунке 1.

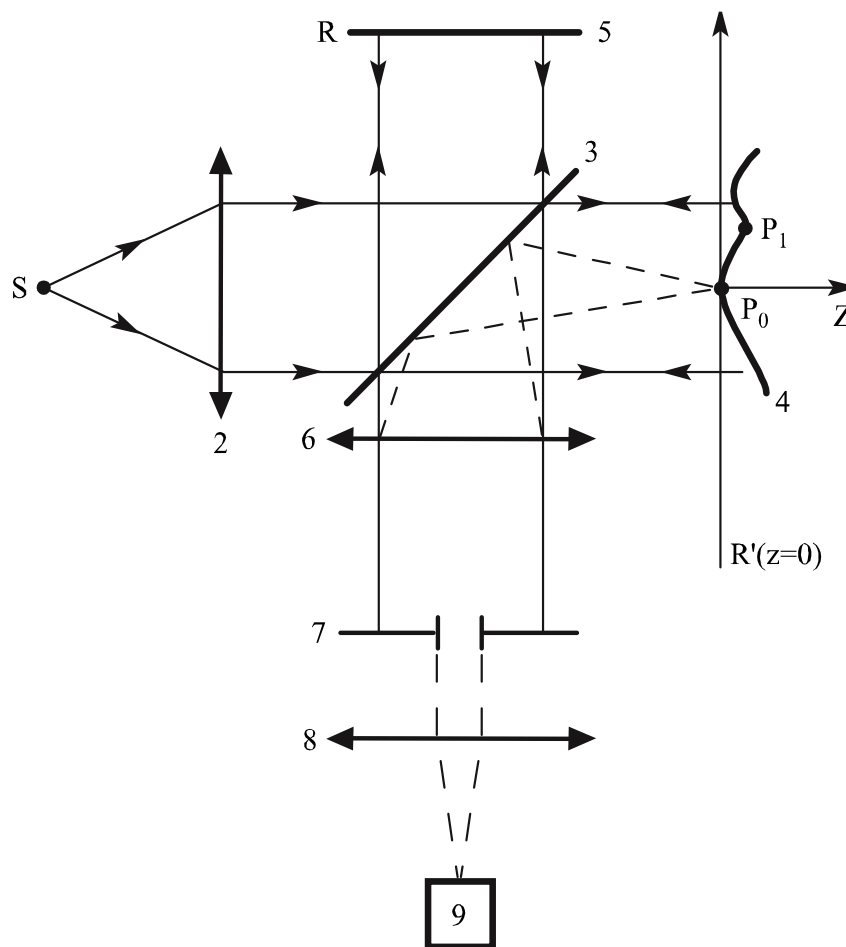


Рис. 1. Функциональная схема частично когерентного интерференционного зонда: S – светодиод; 2, 6, 8 – микрообъективы; 3 – светоделиватель; 4 – исследуемая поверхность; 5 – зеркало; 7 – диафрагма; 9 – фотоприёмный блок

В работе приведен частично когерентный интерференционный зонд с источником излучения белого света, имеющим длину когерентности $l_c = 1$ мкм. Плоскости R и R' проецируются в 9. Фотоприёмник сфокусирован на плоскость R' и R , R' находятся на одинаковом расстоянии от источника S .

Микрообъективы используемые в установке ($10\times$, $f = 18$ мм, $A = 0,2$) служили для фокусировки светового пучка на поверхность материала и зеркала находящееся в опорной ветви интерферометра.

Информация о поверхности исследуемого образца извлекается с помощью специального программного обеспечения.

Технические характеристики:

- погрешность, мкм – 1;
- пределы перемещения исследуемого объекта по 2-м осям, мм – ± 2 ;
- фотоприёмный блок – фотокамера «Canon»;
- источник частично когерентного света – светодиод белого света;
- длина когерентности излучения, мкм – 1;
- расстояние до измеряемой поверхности – 30 мм

Экспериментальные результаты и их обсуждение. При контроле измеряемой поверхности в опорной ветви интерферометра изменялась оптическая разность хода за счет движения опорного зеркала. Опорное зеркало приводилось в движение посредством электромагнитного механизма. Максимальный сигнал в фотоприёмном блоке регистрировался при максимуме контраста интерференционной картины, что соответствовало равенству оптических длин в ветвях интерферометра. В установке реализовано техническое решение, которое позволило постоянно фокусировать световой пучок на поверхности при движении опорного зеркала. Пространственное положение светодиода изменялось во времени вдоль оси распространяющегося излучения с частотой перемещения опорного зеркала. Отношение амплитуд перемещения светодиода и опорного зеркала составляло 1:50. Для графического представления результатов применялась специально написанная программа.

В работе приведено визуально наблюдаемое изображение поверхностей объектов, где представлены контрастные интерференционные картины (рисунок 2). Эти участки поверхностей соответствует равенству расстояний в ветвях интерференционного зонда в пределах длины когерентности l_c .

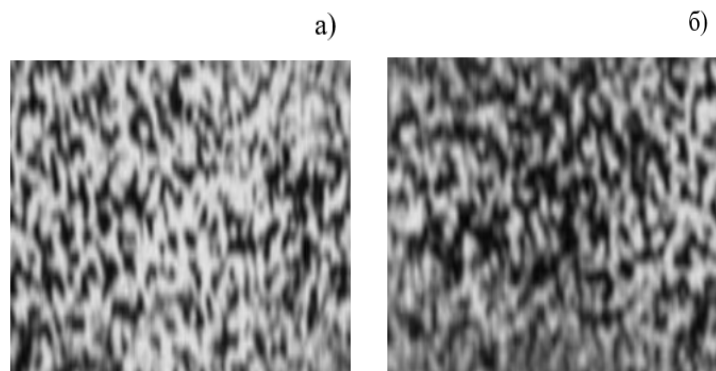


Рис. 2. Наблюдаемые интерференционные поля от двух поверхностей:
а – керамическая пластина без поверхностных дефектов;
б – керамическая пластина с поверхностными дефектами

На рисунке 3 приведены экспериментальные результаты измерений в направлении ОХ и ОУ.

Поверхности ориентировались относительно светового пучка под углом $\theta = 0$ и для каждой точки поверхности производилось 100 измерений при перемещении поверхности в направлении ОХ и ОУ. Материалы фиксировались на микрометрическом столе и перемещение их осуществлялось относительно светового пучка с шагом 20 мкм. Анализировался участок для обоих образцов 200 мкм $\times$ 200 мкм.

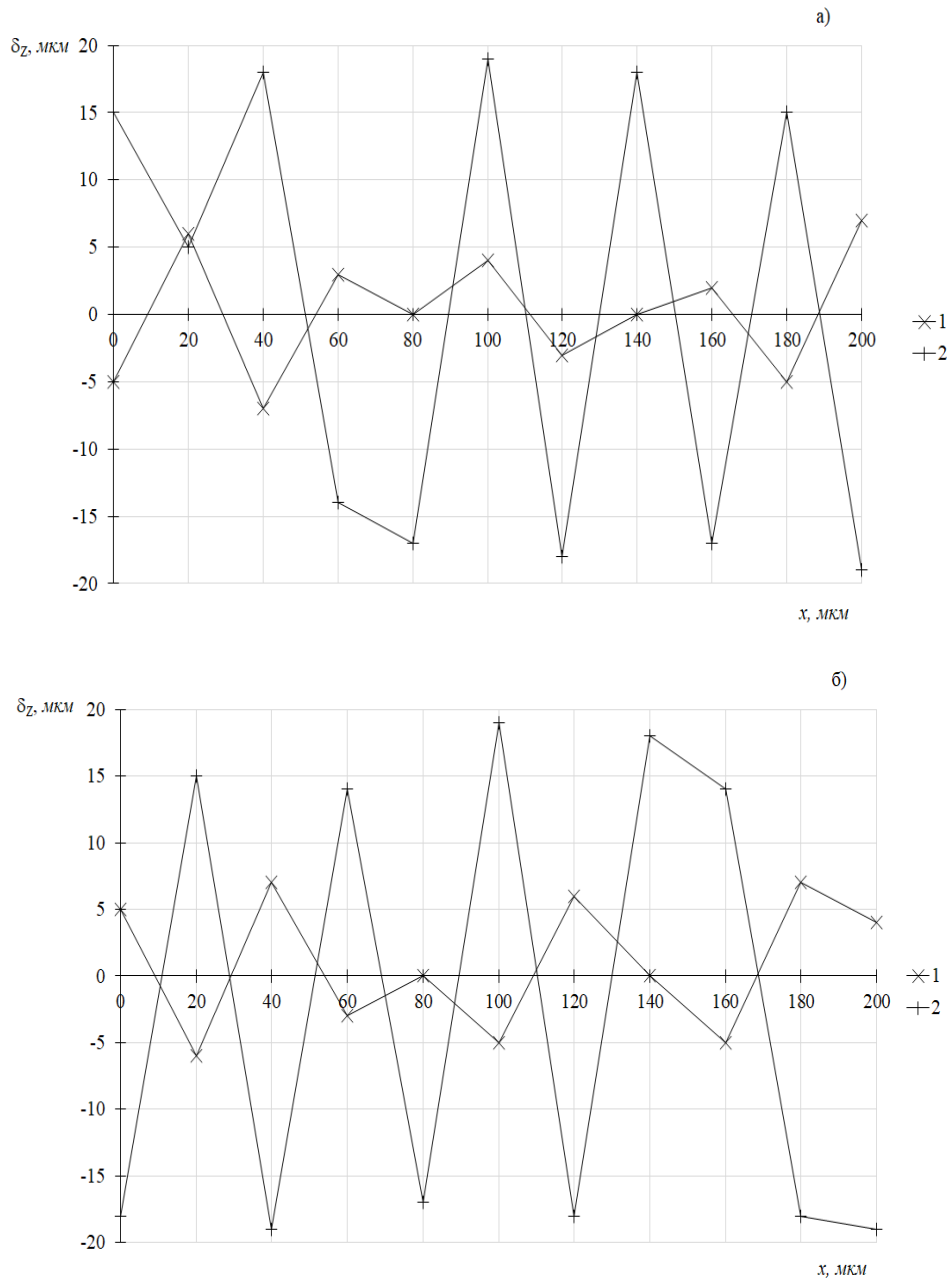


Рис. 3. Флуктуации результатов измерений расстояния до поверхности объектов: а – по оси ОХ; 1 – без поверхностных дефектов; 2 – при наличии поверхностных дефектов; б – по оси ОУ; 1 – без поверхностных дефектов; 2 – при наличии поверхностных дефектов

Номинальное расстояние до поверхности оставалось неизменным, и регистрировались флуктуации результатов измерений этого расстояния, обусловленные измерением интерференционного сигнала.

Эксперимент показал, что для поверхности, не имеющей дефектов результаты измерений расстояния до поверхности при движении в направлении оси ОХ и ОУ находятся на уровне от 0 мкм до 7 мкм, а для поверхности с наличием дефектов – в диапазоне от 14 мкм до 19 мкм.

Заключение. В данной работе показана возможность контроля микрорельефа поверхности экспериментальным интерференционным зондом. Получены флуктуации результатов измерений расстояния до объекта. Представленные результаты измерений показывают, что не имеющей дефектов материал имел флуктуации измерений расстояния до поверхности при движении в направлении оси ОХ и ОУ на уровне от 0 мкм до 7 мкм, а с наличием дефектов – в диапазоне от 14 мкм до 19 мкм. Полученные данные могут заинтересовать производителей рассмотренного материала.

Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. 1970. 855 с.
2. Голубев И.В., Сысоев Е.В., Чугуй Ю.В. Измерение поверхностных дефектов на основе низкокогерентной интерферометрии // Датчики и системы. 1999. № 6. С. 25-30.
3. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.В. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. Л: Лениздат, 1887. 294 с.
4. Малакара Д. Оптический производственный контроль: пер. с англ. под ред. Соснова А.Н. М.: Машиностроение. 1985. 340 с.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение. 1987. 264 с.
6. Сысоев Е.В., Голубев И.В., Чугуй Ю.В., Шахматов В.А. Измерение локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // Автометрия. 2004. Т. 40, № 5. С. 4-13.
7. Духопел И.И., Федина Л.Г. Интерференционные методы и приборы для контроля правильности формы сферических поверхностей // ОМП. 1973. №8. С. 50 – 55.
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., Ушверидзе Л.А. Оптимизация динамических параметров оптического щупа триггерного типа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. №2 (78). С. 13-16.
12. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А. Расчет параметров сканирования интерферометрической системы контроля формы диффузно отражающих объектов // Приборы. 2012. №7 (145). С.23-25.

13. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение. 1983. 231 с.

14. Майоров Е.Е., Костин Г.А., Курлов В.В., Баранов Н.Е. Исследование динамической поверхности летательного аппарата интерференционным методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 8. С. 722–726. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726.

15. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение. 2013. Том 23. №2. С. 38-46.

16. Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Пушкина В.П., Дагаев А.В. Исследование низкокогерентного интерферометрического зонда, при работе в сканирующем режиме измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 790–797. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-790-797.

17. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А. Разработка компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Приборы. 2015. №11 (185). С.26-31.

18. Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Хайдаров А. Г., Черняк Т. А. Оптико-электронный прибор для контроля геометрических параметров диффузно отражающих объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 388—394.

19. 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.

20. Майоров Е.Е., Бородянский Ю.М., Гулиев Р.Б., Дагаев А.В., Таюрская И.С. Микроинтерференционные исследования деформированной поверхности при наклонном падении светового пятна // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 12. С. 146-151. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-12-145-146.

Майоров Евгений Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, majorov_ee@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Голубков Владимир Александрович, канд. техн. наук, доцент, viktor-golubkov@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Гулиев Рамиз Балахан оглы, канд. техн. наук, доцент, ramiz63@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Дагаев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, adagaev@list.ru, Россия, Ивангород, Ивангородский гуманитарно - технический институт (филиал)

USING A PARTIALLY COHERENT INTERFERENCE PROBE TO MEASURE THE MICRORELIEF OF THE SURFACE OF TREATED CERAMIC PLATES

E.E. Maiorov, V.A. Golubkov, R.B. Guliyev, A.V. Dagaev

The work to the use of a partially coherent interference probe to measure the microrelief of the surface of treated ceramic plates is devoted. In optical instrumentation, this method makes it possible to evaluate not only the smoothness of surfaces, the quality of polishing the material, but also to determine the level of wear on the working surfaces of devices for processing optical products and to identify surface microdefects, so the work is relevant and promising. The paper sets the goal, the task of the study, and defines the method and object of the study. A functional diagram of the measuring probe is provided. Microreliefs of the studied surfaces and the results of measurements of the distance to the surface when moving in the direction of the OX and OY axes were obtained. The presented results of surface measurements in the absence and presence of surface microdefects.

Key words: measured surface, interferometry, ceramic plate, interference probe, photodetector unit, reference mirror, interferometer branches.

Maiorov Evgeny Evgenievich, candidate of technical sciences, docent, majorov_ee@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Golubkov Viktor Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, viktor-golubkov@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Guliyev Ramiz Balahan oglu, candidate of technical sciences, docent, ramiz63@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Dagaev Aleksander Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, adagaev@list.ru, Russia, Ivangorod, Ivangorodskii Humanitarian-Technical Institute (branch of Saint-Petersburg University of Aerospace Instrumentation

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Г.А. Вобликов

Данная статья посвящена применению современных методов компьютерного моделирования в разработке и оптимизации технологических изготовления деталей в промышленности, в частности, при отбортовке цилиндрических изделий с фланцевой частью. Отмечается, что компьютерное моделирование позволяет визуализировать процесс получения детали, выявить потенциальные дефекты, оптимизировать параметры процесса, подобрать оптимальную геометрию инструмента и спрогнозировать свойства готового изделия. Это значительно сокращает количество экспериментов и доработок, экономя время и ресурсы. В статье приведен пример моделирования процесса отбортовки цилиндрического изделия с фланцевой частью в программном обеспечении, основанном на методе конечных элементов. Анализируется влияние трения на силу, необходимую для преодоления сопротивления материала. Результаты показывают, что увеличение коэффициента трения приводит к значительному росту силы. Подчеркивается важность и эффективность применения компьютерного моделирования в разработке и оптимизации технологических процессов и отмечает, что дальнейшее развитие этих методов позволит еще более эффективно разрабатывать и совершенствовать технологические процессы.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, математическое моделирование, программное обеспечение, анализ данных, машиностроение, технологическая сила.

Современные методы компьютерного моделирования и специализированное программное обеспечение произвели революцию в разработке и совершенствовании технологий получения металлических деталей, значительно сократив время и затраты на подготовку производства [1-10]. Это касается многих технологических процессов машиностроительной отрасли, включая сварку, литье, трехмерную печать, обработку металлов давлением. Для получения сложных деталей, которые являются новыми для производственной линии.

Компьютерное моделирование, в частности, для штамповки позволяет:

- Визуализировать процесс деформации материала на всех этапах формоизменения, а также на последующих операциях.
- Выявить проблемные зоны и потенциальные дефекты (разрывы, складки, недоштамповка) еще на этапе проектирования.
- Оптимизировать параметры процесса (усилия, температурные режимы, термообработки, последующей механической обработки, например, сверление, шлифование и пр.).
- Подобрать оптимальную геометрию инструмента для получения необходимого изделия соответствующей формы, размера и с необходимыми характеристиками.

- Спрогнозировать свойства готового изделия и провести последующие проверки на предполагаемую прочность, твердость, устойчивость и пр.

- Подобрать технологическое оборудование для проведения операции.

Все это дает возможность значительно сократить количество экспериментов и доработок и исправления оснастки, что экономит время и ресурсы. Типовой процесс разработки технологии с применением моделирования:

1. Создание 3D-модели предполагаемой детали, заготовки и оснастки.

2. Задание свойств материала заготовки и предполагаемого технологического оборудования.

3. Определение условий и параметров процесса.

4. Проведение расчета.

5. Анализ результатов и оптимизация процесса.

В частности, существуют изделия из металлов и сплавов, представляющие собой цилиндрическое изделие с фланцевой частью. Одним из методов получения которого является отбортовка. Этот процесс является сложным, особенно при отбортовке с утонением. Поэтому рационализация процесса, его изучение является важной задачей. В данном случае также важную роль играет трение, которое будет анализироваться в данной работе с помощью компьютерного моделирования при отбортовке изделия (рис. 1).

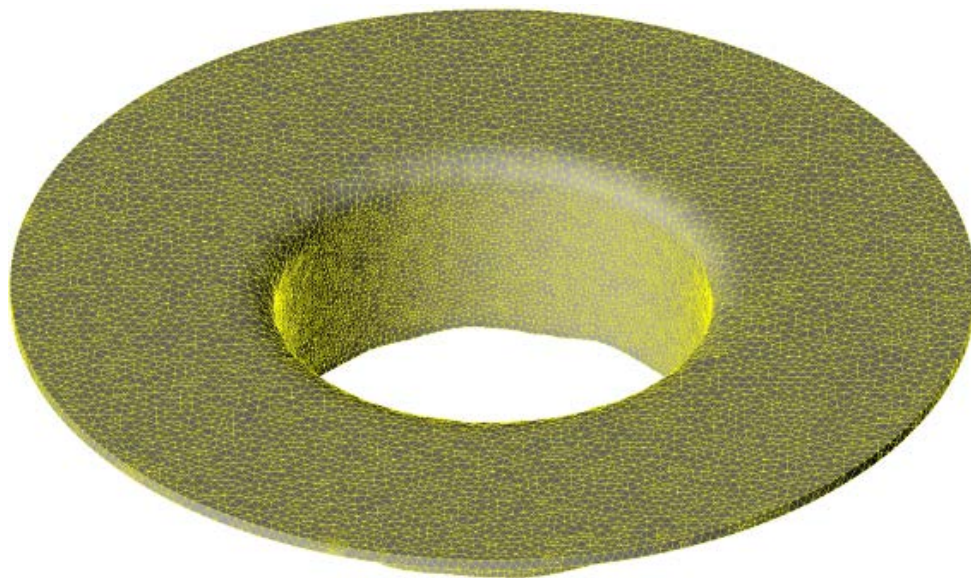


Рис. 1. Разбитие детали на конечные элементы

Программное обеспечение, используемое в данной работе – Qform, основано на методе конечных элементов. Моделирование проводилось для плоской листовой заготовки толщиной 2 мм с центральным отверстием из стали 08кп. График силы приведен на рисунке 2.



Рис. 2. График силы: линия сверху – при трении 0,3, линия снизу – при трении 0,1

При трении 0,3 (оранжевая линия) сила достигает максимума около 185 кН в то время, как, при трении 0,1 (синяя линия) сила достигает максимума около 140 кН. Оба графика демонстрируют схожую начальную фазу быстрого роста силы, но значение силы при большем трении начинает увеличиваться быстрее. После достижения максимума у обеих линий начинается спад. При трении 0,3 спад силы более резкий, но общий уровень значений остается выше по сравнению с трением 0,1. Увеличение трения значительно влияет на максимальную величину силы и характер её снижения. График показывает, что увеличение коэффициента трения (с 0,1 до 0,3) приводит к значительному увеличению силы, необходимой для преодоления сопротивления, а также изменению характера её динамики. Таким образом для снижения силы более чем на 20% требуется использование смазочной жидкости с более низкими показателями коэффициента трения.

Приведенная статья демонстрирует важность и эффективность применения компьютерного моделирования в разработке и оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением, в частности, при отбортовке цилиндрических изделий с фланцевой частью. Дальнейшее развитие и применение методов компьютерного моделирования в обработке металлов давлением позволит еще более эффективно разрабатывать и совершенствовать технологические процессы, обеспечивая высокое качество и требуемые свойства готовых изделий при минимальных затратах времени и ресурсов.

Список литературы

1. Рыбин Ю. И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением / Ю.И. Рыбин, А.И. Рудской, А.М. Золотов. Л.: Наука, 2004. 644 с.

2. Каменев С. В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебное пособие / С. В. Каменев; Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2019. 110 с.

3. Куликова Е. А., Чуваков А. Б., Петровский А. Н. Автоматизация производственных процессов в машиностроении : учебник и практикум для вузов / Москва : Издательство Юрайт, 2025. 252 с.

4. Поршнев С.В. Компьютерное моделирование физических систем с использованием пакета MathCAD: Учебное пособие / С.В. Поршнев. М.: Горячая линия -Телеком, 2011. 320 с.

5. Тимофеев, В.Б. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB: Учебное пособие / В.Б. Тимофеев. СПб.: Лань КПТ, 2015. 736 с.

6. До А. Т. Холодная штамповка осесимметричных деталей с торцевыми утолщениями из прутковых и трубных заготовок : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / 2022. 147 с. EDN RJYCEW.

7. Яковлев С. С., Шишкина А. А. Исследование повреждаемости материала при гофрировании трубчатой заготовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 9. С. 715-717. EDN GGTQIG.

8. Вытяжка листовых заготовок переменной толщины для изготовления корпусных деталей электротехнической промышленности / А. Н. Малышев, С. А. Бысов, В. Д. Кухарь [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 4. С. 30-36. EDN OLOLCC.

9. Ташматова Ш. С., Ганиева Т. И., Курбонова К. Э. Компьютерное моделирование и автоматизация технологических процессов производства в машиностроении // Теория и практика современной науки. 2020. №3 (57).

10. Солодилова Н.А. Новые технологии проектирования в рамках дисциплины «САПР в машиностроении» // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 июня 2019 года / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. С. 391–397.

Вобликов Григорий Алексеевич, сотрудник, griha71tyla@gmail.com, Россия, Тула, АО "НПО "СПЛАВ"

USING SOFTWARE AND COMPUTER SIMULATION TO DEVELOP TECHNOLOGY FOR PRODUCING PARTS

G.A. Voblikov

This article is devoted to the use of modern computer modeling methods in the development and optimization of technological manufacture of parts in industry, in particular, when selecting cylindrical products with the flange part. It is noted that computer modeling allows you to visualize the process of obtaining a part, identify potential defects, optimize the

parameters of the process, choose the optimal geometry of the tool and predict the properties of the finished product. This significantly reduces the number of experiments and improvements, saving time and resources. The article provides an example of modeling the process of selecting a cylindrical product with the flange part in the software based on the finite elements method. The effect of friction on the force necessary to overcome the resistance of the material is analyzed. The results show that an increase in the coefficient of friction leads to a significant increase in force. The importance and effectiveness of the use of computer modeling in the development and optimization of technological processes is emphasized and notes that the further development of these methods will allow you to even more effectively develop and improve the technological process.

Key words: computer modeling, mathematical modeling, software, data analysis, mechanical engineering, technological force.

Voblikov Grigory Alekseevich, employee, griha71tyla@gmail.com, Russia, Tula, JSC NPO SPLAV

УДК 303.732.4, 519.25, 519.85
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-222-223

ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ РАНЖИРОВАНИЯМИ

А.А. Даничев, А.И. Карнаухов, С.А. Войнаш, Д.Н. Клёсов

В статье решается задача формирования закона распределения случайной величины, представленной ранжированиями. Используются мера близости в порядковых шкалах и свойства перестановок.

Ключевые слова: вероятностное распределение, порядковая шкала.

Использование порядковых шкал весьма распространено при опросах, тестах, экспертных оценках. Известно, что задание количественных соотношений между объектами для респондента представляет сложную задачу. Кроме того, есть исследования, показывающие, что человек не способен корректно давать такие оценки. Наиболее естественной является оценка объектов в порядковых (качественных) шкалах. Т.е. для объектов А и Б возможны следующие оценки: объект А предпочтительней объекта Б, объект А менее предпочтителен объекту Б или объекты равноценны. Ответом респондента является набор парных сравнений объектов. В случае если количество объектов не велико (не более 7-10), то более простой формой ответа является непосредственное ранжирование экспертом объектов в порядке их предпочтения [1].

При решении задач, связанных с применением математического аппарата теории вероятностей и математической статистики, как правило имеют дело с данными, измеренными в шкалах равных отношений или интервальных шкалах. Так, в справочнике [2] описаны 13 дискретных и 35

непрерывных одномерных вероятностных распределений, наиболее часто используемых на практике. Номинальные шкалы выступают в виде категориальных данных. Но для порядковых шкал специальные статистические методы отсутствуют. Следует заметить, что расчет мер близости для ранжирований требует большого объема вычислений. Необходимость вычислительной техники и тот факт, что математический аппарат бинарных отношений не входит в стандартные образовательные курсы, привели к тому, что на практике применяются другие способы расчета. По сути, у исследователя остается два варианта:

- рассматривать ранги как баллы;
- использовать в качестве меры близости двух наборов сравнений критерий Манна-Уитни-Вилкоксона [3] или коэффициент ранговой корреляции Спирмена [4].

Первый подход дает возможность применять стандартные методы мат. статистики, но сильно искажает результат. Ведь производить с рангами операции сложения и вычитания, применять к ним формулы классических дискретных распределений недопустимо.

Второй подход позволяет решать ограниченное количество задач и вносит сильную путаницу при интерпретации результатов (тем не менее, позволяет получить количественный результат).

При попытке грамотно провести анализ данных или произвести планирование эксперимента неизбежно возникают вопросы. Что такое случайные данные в порядковых шкалах? Как добавить в модель случайный шум? Как оценить количество вопросов для приемлемой точности теста?

В данной работе рассматривается случай строгих ранжирований (антирефлексивные отношения линейного порядка) [1,5] и вероятностное распределение расстояния между случайными ранжированиями.

Отношения и представления отношений. Для обработки данных, измеренных в порядковой шкале (в виде баллов, градаций, рангов, упорядочиваний) необходимо применять математический аппарат бинарных отношений [1,5]. Сравнения представляются в виде *матриц отношений*. Строки и столбцы матрицы $\|t_{ij}\|$ отношения P соответствуют элементам множества A . Для представления отношений линейного порядка используется матрица $\|t_{ij}\|$ с элементами

$$t_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } (a_i, a_j) \in P, (a_j, a_i) \notin P \\ & \text{(эксперт предпочитает объект } a_i \text{ объекту } a_j), \\ 0, & \text{если } (a_i, a_j) \in P, (a_j, a_i) \in P \\ & \text{(эксперт считает объекты } a_i \text{ и } a_j \text{ равноценными)}, \\ -1, & \text{если } (a_i, a_j) \notin P, (a_j, a_i) \in P \\ & \text{(эксперт предпочитает объект } a_j \text{ объекту } a_i), \end{cases}$$

Ранжирования являются отношениями линейного порядка. Строгие ранжирования антирефлексивны (объект может быть равноценен только

себе). Ранжирование удобно отображать вектором рангов $R = (r_1, \dots, r_m)$ (объект a_i находится на r_i месте).

Для нахождения итогового рейтинга опроса или «среднего» упорядочивания используются специальные алгоритмы (метод строчных сумм, медиана Кемени, метод Чебаторева и другие) [1, 5-8].

Меры близости, определенные на матрицах отношений, позволяют определить, насколько близки или далеки ответы респондентов. Расстояние между ранжированиями R и R_k , которым соответствуют матрицы отношений $\|t\|_{m \times m}$ и $\|t^k\|_{m \times m}$, следует определять по известной формуле

$$d(R, R_k) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m |t_{ij} - t_{ij}^k|$$

Данная формула определяет единственную меру близости на отношениях линейного порядка [1]. Максимально возможное расстояние между ранжированиями равно $m(m-1)$.

Вектора рангов для строгих ранжирований соответствуют перестановкам их индексов. Расстояние между ранжированием и новым ранжированием, полученным перестановкой местами рядом стоящих объектов равно 2. Расстояние между строгими ранжированиями соответствует удвоенному числу инверсий в соответствующих перестановках. Всего возможно $m!$ различных перестановок, где m – количество объектов.

Изучение распределения расстояний до заданного ранжирования. В табл.1 представлен пример для трёх объектов. Всего возможно шесть строгих ранжирований. Указано число инверсий $Inv(R_k)$ и расстояние $d(R, R_k)$ от произвольного ранжирования R_k до фиксированного $R = (1, 2, 3)$.

Таблица 1

Возможные расстояния для трёх объектов

k	1	2	3	4	5	6
Объекты	Вектора рангов R_k					
a_1	1	1	2	2	3	3
a_2	2	3	1	3	1	2
a_3	3	2	3	1	2	1
$Inv(R_k)$	0	1	1	2	2	3
$d(R, R_k)$	0	2	2	4	4	6

При однократном равновероятном выборе одного из возможных ранжирований получим дискретный вероятностный ряд для $d(R, R_k)$ (табл.2).

Таблица 2

Плотность распределение возможных расстояний до случайного ранжирования

d	0	2	4	6
Частота	1	2	2	1
Вероятность	0,17	0,33	0,33	0,17

Так как возможные расстояния d между ранжированиями соответствуют числу перестановок, для изучения распределения случайной величины d обратимся к изучению числа инверсий в перестановках.

Равновероятное распределение строгих ранжирований. Расстояние между строгими ранжированиями соответствует числу инверсий в соответствующих перестановках. В свою очередь количество инверсий в перестановках соответствует числу Mahonian [9, 10]:

$$M(0,0) = 1,$$

$$M(0,c) = 0 \quad \text{for } c \neq 0$$

$$M(r,c) = \sum_{k=0}^r M(r-1, c-k) \quad \text{for } r > 0$$

Вычисляется $M(r, c)$ по рекуррентной формуле. Первые числа Mahonian для шести объектов, начиная с $M(1,0)$, представлены в табл.3.

Количество одинаковых расстояний равных d_k равно $M(m, d_k / 2)$. Всего возможно $m!$ различных перестановок, где m – количество объектов. Таким образом, вероятность $P(d_k=d)$, того, что расстояние до случайного ранжирования равно d_k определяется как

$$P(d_k=d) = M(m, d_k / 2) / m! \quad (1)$$

В табл. 4 представлен дискретный вероятностный ряд для однократного равновероятного выбора одного из возможных ранжирований. На рис.1 для $m = 10$ построена гистограмма плотности распределения возможных расстояний и выделены квантили.

Таблица 3

Первые числа Mahonian $M(m, c)$

m	Возможное количество инверсий c															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1															
2	1	1														
3	1	2	2	1												
4	1	3	5	6	5	3	1									
5	1	4	9	15	20	22	20	15	9	4	1					
6	1	5	14	29	49	71	90	101	101	90	71	49	29	14	5	1

Таблица 4

Вероятность $P(d_k=d)$, %

m	Возможное расстояние d_k															
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
1	100															
2	50	50														
3	17	33	33	17												
4	4	13	21	25	21	13	4									
5	1	3	8	13	17	18	17	13	8	3	1					
6	0	1	2	4	7	10	13	14	14	13	10	7	4	2	1	0

Рассмотрим возможность применения меры близости на примере известной методики косвенного измерения системы самооценок (КИСС) [11].

Планирование эксперимента. Методика косвенного измерения системы самооценок создана на основе принципа проективного подхода к диагностике личности. Респонденту предлагается разлагать 10 карточек в ряд так, чтобы слева была та, на которой изображено лицо самое похожее на него, справа – та, на которой изображено самое непохожее, а между ними карточки лежали в порядке убывания «похожести» лиц, которые на них изображены. Далее предлагается разложить их по параметрам «приятность», «ум», «доброта» и т. д. Каждую последовательность карточек можно представить строгим упорядочиванием (ранжированием). Затем необходимо определить близость между ними.

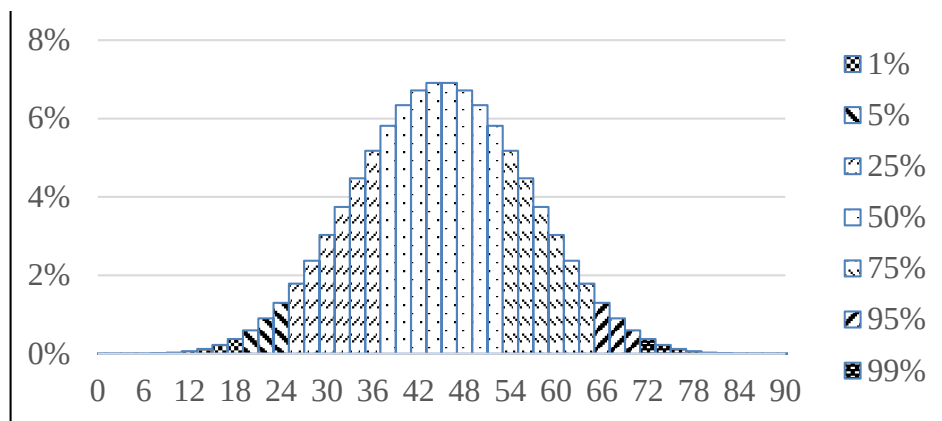


Рис.1. Плотность распределения возможных расстояний до случайного ранжирования 10-и объектов

В данной методике отсутствует способ определения ложных ответов. Изучим вопрос, сколько карточек необходимо сравнивать, чтобы отличить случайные ответы от достоверных. Допустимо ли применение меньше, чем 10 карточек?

При случайных ответах распределение расстояний d_k соответствовать строчкам табл.4. Зададим 1% порог отличия честного ответа от случайного. Другая интерпретация - 1% наибольших и 1% наименьших ответов соответствуют неадекватно низкому и высокому уровням самооценки. Именно эти диапазоны ответов должен выявлять тест.

Так, для $m = 5$ только расстояния равные 0 и 20 имеют низкие вероятности (1%). Т.е. возможно дать только $n=2$ варианта ответа, который будет достоверно отличными от возможного случайного шума. Для $m = 6$ это будут расстояния 0, 2, 28, 30 и $n = 12$ соответствующих вариантов из табл.3.

В табл.5 для различных значений m подсчитаны:

$m!$ - количество вариантов ответов;

n - сумма числа достоверных минимальных и максимальных расстояний из табл.3;

$n!?$ - обратный факториал n (через гамма-функцию).

Обратный факториал позволяет оценить число благоприятных вариантов в количествах «карточек».

Руководствуясь табл.5 можно сделать вывод о приемлемом количестве карточек для сравнения. При $m = 7$ можно рассчитывать на корректную работу теста. При $m = 9$ число комбинаций становится достаточно велико, чтобы быть уверенным в результатах тестирования.

Таблица 5

Оценка ответов для порога 1%.

m	m!	n	n!?
5	120	2	
6	720	12	3,5
7	5 040	54	4,5
8	40 320	570	5,8
9	362 880	4 596	6,9
10	3 628 800	60 478	8,1
11	39 916 800	660 244	9,2

Заключение. В работе рассмотрено вероятностное распределение расстояний между случайными ранжированиями. Показана возможность находить квантили распределения и выполнять теоретические построения.

Список литературы

1. Литвак Б. Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 255 с.
2. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001. 295 с.
3. Новиков Д.А. Статистические методы в педагогических исследованиях (типовые случаи). М.: МЗ-Пресс, 2004. 67 с.
4. Симушкин С.В. Многомерный статистический анализ. Казань: Издательство КГУ, 2006. 98 с.
5. Гехман А.В. Обработка результатов экспертиз в реестре научно-технических разработок / А.В. Гехман, Ю.Ю. Якунин, А.А. Даничев, А.А. Володин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнёва. Красноярск: СибГАУ, 2010. Вып. 6(32). С. 30-34.
6. Метод минимального несогласия / А.А. Даничев, А.И. Карнаухов, С.И. Затенко [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 142-147.
7. Алгоритм формирования и визуализации множества Парето для ранжирований / А.А. Даничев, А.И. Карнаухов, С.И. Затенко [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. № 7. С. 87-91.
8. Алгоритм обработки данных в порядковых шкалах для систем анализа оценки дисциплин / А.А. Даничев, А.И. Карнаухов, С.А. Войнаш, С.И. Затенко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 3. С. 147-150.
9. Triangle of Mahonian numbers (The OEIS Foundation Inc.) URL: <http://oeis.org/A008302> (дата обращения: 01.11.2024)

10. Дональд Э. Кнут Искусство программирования. Том 3. Сортировка и поиск. Изд-во «Вильямс», 2012. 824 с.

11. Бодалев А.А. Общая психодиагностика / А.А. Бодалев, В.В. Столин, В.С. Аванесов. – СПб.: Изд-во «Речь», 2000. 440 с.

Даничев Алексей Александрович, канд. техн. наук, доцент, adanichev@sfu-kras.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет,

Карнаухов Андрей Иванович, канд. техн. наук, доцент, karnaukhov.ai@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева,

Войнаш Сергей Александрович, младший научный сотрудник, sergey_voi@mail.ru, Россия, Рубцовск, Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,

Клёсов Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, d.n.klesov@yandex.ru, Россия, Москва, МИРЭА - Российский технологический университет

FORMATION OF THE DISTRIBUTION LAW OF A RANDOM VARIABLE REPRESENTED BY RANKINGS

A.A. Danichev, A.I. Karnaukhov, S.A. Voinash, D.N. Klyosov

The article solves the problem of forming the distribution law of a random variable represented by rankings. The measure of proximity in ordinal scales and the properties of permutations are used.

Key words: probability distribution, ordinal scale.

Danichev Alexey Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, adanichev@sfu-kras.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University,

Karnaukhov Andrey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, karnaukhov.ai@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,

Voinash Sergey Aleksandrovich, junior researcher, sergey_voi@mail.ru, Russia, Rubtsovsk, Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University,

Klyosov Dmitry Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, d.n.klesov@yandex.ru, Russia, Moscow, MIREA - Russian Technological University

УДК 004

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-229-230

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

П.Ю. Гусев, В.В. Сокольников, И.В. Поцбенева

В работе описывается реализация программы управления элементами полета беспилотного аппарата. Проведен анализ применения беспилотных летательных аппаратов, а также перспективы развития отрасли. Рассмотрены возможности использования элементов автономного полета. Для достижения поставленной цели рассмотрено решение задач: выбор инструментов реализации, разработка алгоритма управления элементами полета, программная реализация алгоритма. Подробно рассмотрены возможности применения программных и аппаратных платформ при реализации автономного полета.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, автономный полет, MAVLink.

Развитие беспилотных авиационных систем (БАС) является одной из наиболее актуальных задач технологического развития, обеспечивающих качественное изменение сфер жизнедеятельности человека. Среди направлений применения БАС можно выделить логистику и транспорт [1]. Задачи, которые могут решаться с применением беспилотных аппаратов – доставка грузов в труднодоступные и отдаленные районы, доставка товаров до потребителей в крупных городах [2]. Важным направлением исследований применения БАС является также мониторинг состояния строительных объектов и повышение безопасности эксплуатации опасных производственных объектов [3-4].

Отдельно следует выделить возможности применения БАС в сельском хозяйстве [5-6]. Необходимо отметить, что сельское хозяйство является наиболее инновационной сферой деятельности в части применения БАС. Уже в настоящее время внедрены и используются беспилотные технологии обработки полей, анализа посевов. Ведутся экспериментальные работы по проведению посевных работ с применением БАС, а также по сбору урожая с применением БАС. Помимо сельского хозяйства уже используются технологии БАС в определении и локализации лесных пожаров, что в значительной степени повышает сохранность лесных массивов [7].

Большая часть рассматриваемых способов применения БАС основывается на применении летательных аппаратов с удаленным управлением. То есть, фактически, пилот существует, но не находится непосредственно в летательном аппарате. Практически все задачи, выполняемые пилотом беспилотного аппарата, могут быть выполнены в автономном полете. Автономный полет беспилотного средства значительно расширяет возможности применения летательных аппаратов, а также снижает затраты

на эксплуатацию летательного аппарата [8-9]. Беспилотные летательные аппараты с автономным полетом в настоящее время уже существуют, но задачи поиска путей снижения стоимости и повышения надежности эксплуатации подобных аппаратов всегда остаются актуальными [10].

Целью данной работы является обеспечение возможности автономного полета за заданным объектом путем его детекции с применением модели искусственного интеллекта. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- осуществлен выбор технических средств реализации;
- разработан алгоритм управления беспилотным летательным аппаратом;
- реализован программный код управления полетом в режиме следования летательного аппарата за объектом.

Выбор технических средств реализации программы управления. Разработка программы управления полетом может быть реализована с применением различных программных и аппаратных средств. В настоящее время на рынке представлены различные виды полетных контроллеров, а также вспомогательных элементов, обеспечивающих различные способы управления беспилотным летательным аппаратом. В части выбора программного средства реализации выбор основывается на двух составляющих: возможности управления с использованием выбранного языка программирования и компетенций в применении выбранного языка программирования. Не смотря на спорность второй составляющей, современные API-интерфейсы в большинстве случаев поддерживают мультиязычность, что позволяет также ориентироваться на компетенции в области применения конкретного языка.

Для управления беспилотными летательными аппаратами разработано множество программных платформ: ArduPilot от 3DR [11], Paparazzi UAV [12], Hangar autopilot [13], PX4 Flight Stack [14], MultiWii [15] и другие. Одной из наиболее популярных платформ является ArduPilot, которая обеспечивает множество настроек беспилотного летательного аппарата. Дополнительное преимущество ArduPilot – это программное обеспечение с открытым исходным кодом, что обеспечивает возможность неограниченной модификации и доработки под свои требования.

Наибольший интерес при разработке программы управления автономным полетом представляет Micro Aerial Vehicle Link (MAVLink) – протокол, обеспечивающий связь между беспилотными аппаратами и наземными станциями [16]. MAVLink работает по принципу сериализации сообщений о состоянии системы и командах, которые должны быть выполнены в определенный момент. Команды переводятся в двоичный формат и не зависят от платформы. Двоичный формат обеспечивает одно из главных достоинств протокола MAVLink – его легкость, что минимизирует нагрузку на передачу команд и состояний. К дополнительным преимуществам протокола можно отнести двойную проверку суммы в пакете, что повышает надежность передачи команд и состояний. Таким образом, для разра-

ботки программы управления элементами автономного полета выбрано использование протокола MAVLink.

В качестве аппаратной части использован полетный контроллер Radiolink Pixhawk PIX 2.4.8. Выбор полетного контроллера обусловлен возможностью использования программного обеспечения ArduPilot и протокола MAVLink в полном функционале. Протокол MAVLink может быть использован в других полетных контроллерах и программных платформах, но существуют ограничения на полный функционал протокола.

Имитация действий пилота осуществляется микрокомпьютером, установленным непосредственно на беспилотном летательном аппарате. Видеосигнал, получаемый с камеры аппарата, анализируется с использованием нейронной сети и преобразуется в управляющий сигнал протокола MAVLink. В качестве микрокомпьютера, способного выполнять вычисления с использованием современных нейронных сетей использован Jetson Xavier NX. Следует отметить, что применяемая нейронная сеть может быть оптимизирована и, как следствие, это позволит применить менее производительный микрокомпьютер. Для разработки программы управления использован язык Python, обеспечивающий возможность использования библиотек как для работы с видео, работы с нейронными сетями, а также реализующий отправку команд по протоколу MAVLink.

При выборе средства реализации нейросетевой модели учитывались факторы быстродействия вычислений и простоты обучения, а также возможности решения задачи детекции объекта. Наиболее адекватно поставленным требованиям отвечает YOLO [17]. Особенности применения алгоритма YOLO являются высокая скорость вычислений и небольшой размер модели, а также возможность выбора модели разного размера. Быстродействие YOLO обеспечивается простотой структуры, которая позволяет решать задачи детекции - определения объектов на изображении. YOLO также поддерживает возможность применения детекции в потоковом видео, что делает этот алгоритм универсальным и применимым для программы управления автономным полетом.

Алгоритм и реализация программы управления элементами автономного полета. В общем виде алгоритм управления элементом следования за объектом автономного полета беспилотного летательного аппарата представлен следующим образом:

1. Захват видео с цифровой камеры, установленной на беспилотном летательном аппарате.
2. Детекция объектов на видео.
3. Определение координат детектируемого объекта.
4. Расчет управляющего сигнала.
5. Отправка команды на полетный контроллер.

Первый пункт алгоритма реализуется с применением OpenCV – готовой библиотеки для работы с видео. Реализация OpenCV существует для множества языков программирования, в том числе и для Python. OpenCV с использованием команды VideoCapture позволяет выбрать источник видео

и осуществить его обработку. Следующий программный код обеспечивает получение видео с камеры и запись в лог выбранной камеры.

```
if using_web_cam:
    # testDevice(number_web_cam)
    cap = cv2.VideoCapture(number_web_cam)
    with open(file_out, 'a', encoding='utf-8') as f:
        f.write(dt_string + f" webcam_num: {number_web_cam}" +
            "\n")
```

Один из наиболее важных этапов алгоритма управления элементом следования автономного полета – детекция объекта для следования. Для реализации данного пункта выбрана модель YOLO, как указано ранее. Использована 8 версия модели – наиболее стабильная на момент реализации данной работы. Язык программирования Python обеспечил возможность простого импорта обученной модели в рабочий программный код и ее дальнейшее применение. Доверительный интервал (Confidence Treeshold) установлен равным 0,65. Небольшое доверительное значение связано с особенностями применения летательного аппарата – ввиду отсутствия стабилизации изображение может искажаться и повышение интервала сделает невозможными применение программы управления. Следующий программный код обеспечивает загрузку обученной модели:

```
yolo_det = YOLOv8(model_path, conf_thres=0.65)
```

Следование за объектом осуществляется путем его центрирования в кадре. При приближении к объекту требуется держать объект в нижней части видимости камеры, в противном случае может произойти столкновение с объектом, за которым осуществляется следование. В дальнейшей работе для избегания столкновения предполагается использовать лидар, а также совершенствовать методы расчета координат.

Расчет управляющего сигнала осуществляется путем пересчета координат для смещения центра камеры, которая определяет направление движения беспилотного летательного аппарата. При этом, алгоритм должен учитывать фактически поступающее расширение видео с камеры. В противном случае управляющий сигнал не будет отвечать поставленной задаче. Отправка команды на полетный контроллер осуществляется с использованием протокола MAVLink. Следующий программный код осуществляет отправку команды движения за объектом при расширении FullHD:

```
control_send( master.target_system, round((newY-1080)/1080*250), 0,
300,round((newX-1980)/1980*150))
```

Результаты. В результате разработки программы управления элементами полета беспилотного аппарата с использованием модели искусственного интеллекта реализован алгоритм следования за объектом в автономном режиме. Программная реализация алгоритма обеспечила возможность применения микрокомпьютера в качестве средства определения объ-

екта для следования и выработки управляющего сигнала. Развитие технологий автономного полета беспилотных летательных аппаратов расширит возможности их применения, а также создаст предпосылки для снижения стоимости применения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2024-0006)

Список литературы

1. Машненко Д. В. Перспективы использования БПЛА в логистике // Инновации и инвестиции. 2023. №6.
2. Калмурзаева Дина Кусаинкызы, Багинова Вера Владимировна Беспилотные летающие аппараты как инструмент микрологистики нового поколения // European research. 2017. №1 (24).
3. Ворсин Н. Е., Яковлев А. Е. Применение бпла в проектировании и строительстве автомобильных дорог // Вестник науки. 2024. №5 (74).
4. Кудасова А. С., Тютин А. Д., Сокольников Э. В. Применение беспилотных летательных аппаратов в строительстве // ИВД. 2021. №8 (80).
5. Смелянский М. И., Жуков В. Е. Эксперимент по внедрению беспилотных авиационных систем // Вестник науки. 2024. №9 (78).
6. А. Х. Рахмонов, О. В. Мячина, Р. Н. Ким, Л. Э. Мамасалиева, О. С. Нарзуллаев, Б. А. Пулатов, Г. Я. Исаев Увеличение урожайности хлопчатника при воздействии минеральных удобрений содержащих агроруды // SAI. 2024. №Special Issue 21.
7. Коршунов Н. А., Савченкова В. А., Перминов А. В., Конюшенков М. Е. Перспективные направления применения беспилотных авиационных систем в лесном комплексе // Лесохозяйственная информация. 2022. №2.
8. Тищенко Игорь Петрович, Степанов Дмитрий Николаевич, Фраленко Виталий Петрович Разработка системы моделирования автономного полета беспилотного летательного аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2012. №3-1 (12).
9. Тищенко Игорь Петрович, Степанов Дмитрий Николаевич, Фраленко Виталий Петрович Разработка системы моделирования автономного полета беспилотного летательного аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2012. №3-1 (12).
10. Choi S. Y., Cha D. Unmanned aerial vehicles using machine learning for autonomous flight; state-of-the-art //Advanced Robotics. – 2019. – Т. 33. – №. 6. – С. 265-277.
11. Baldi S. et al. ArduPilot-based adaptive autopilot: Architecture and software-in-the-loop experiments //IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2022. – Т. 58. – №. 5. – С. 4473-4485.
12. Hattenberger G., Bronz M., Gorraz M. Using the paparazzi UAV system for scientific research //IMAV 2014, international micro air vehicle conference and competition 2014. 2014. С. 247-252.

13. Knitter J. et al. Survey of Autonomous Drone Hangars—Opportunities and Challenges for Maritime Platforms //Proceedings of the International Conference on. – 2024. – Т. 2. – С. 81-87.

14. Meier L. et al. Pixhawk: A system for autonomous flight using onboard computer vision //2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2011. – С. 2992-2997.

15. Guliaev N. The design, construction and implementation of an autonomous outdoor quadcopter using an rpi microcomputer and a multiwii flight controller. – 2017.

16. Koubâa A. et al. Micro air vehicle link (mavlink) in a nutshell: A survey //IEEE Access. – 2019. – Т. 7. – С. 87658-87680.

17. Jiang P. et al. A Review of Yolo algorithm developments //Procedia computer science. – 2022. – Т. 199. – С. 1066-1073.

Гусев Павел Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, pavelgsv@gmail.com, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

Сокольников Виктор Владимирович, старший преподаватель, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

Поцебнева Ирина Валерьевна, канд. техн. наук, доцент, ipozebneva@cchgeu.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR CONTROLLING FLIGHT ELEMENTS OF AN UNMANNED VEHICLE USING AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODEL

P.Yu. Gusev, V.V. Sokolnikov, I.V. Pocebneva

The paper describes the implementation of a program for controlling the flight elements of an unmanned aerial vehicle. An analysis of the use of unmanned aerial vehicles, as well as the prospects for the development of the industry, is conducted. The possibilities of using autonomous flight elements are considered. To achieve this goal, the following tasks are considered: selection of implementation tools, development of an algorithm for controlling flight elements, software implementation of the algorithm. The possibilities of using software and hardware platforms in implementing autonomous flight are considered in detail.

Key words: unmanned aerial vehicle, autonomous flight, MAVLink.

Gusev Pavel Yuryevich, candidate of technical sciences, docent, pavelgsv@gmail.com, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Sokolnikov Viktor Vladimirovich, senior lecturer, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Potsebneva Irina Valerievna, candidate of technical sciences, docent, ipozebneva@cchgeu.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 005.743

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-235-236

МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ И КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЕ ДЕТЕРМИНАНТЫ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ

С.А. Назаревич

В статье рассматривается дополнение классической типологии организационных систем, основанное на моделях управления гетерогенными организационными системами. Определены особенности дополнения и верифицирована цель настоящего исследования, представляющая уточнение типологии организационных систем и определение методов измерения и критериев для идентификации состояния бифуркации организационных систем. Представлена система структурной механики процесса приближения организационных систем к состоянию бифуркации, в виде содержательной декомпозиции модели управления знаниями, описанной через кортеж состояний, включающий пять показателей, отображающих достаточность потенциала организационной системы для выбора отдельного элемента или полнофункциональной модели управления знаниями, и осуществления процесса интеграции новой модели или принятия решения о реинжиниринге организационной системы и перехода к более функциональному типу исходя из общей дополненной типологии. Рассмотрены дополнительные предпосылки для дальнейшего исследования, основанные на использовании моделей управления устареванием, включающие разработанный перечень наименований моделей характерных для производимой продукции, услуг, процессов жизненного цикла.

Ключевые слова: организационная система, переходные точки, качество организации, проблемы функциональности организационных систем, процессы, измерения организационного потенциала.

Введение. Проблемы оценки функционального потенциала организационных систем, всегда являются актуальными, так как постоянно релевантны внешним и внутренним вызовам среды. Формирование новых предпосылок, связанных с вопросами оценки потенциала организационных систем тесно связаны с качеством функционального менеджмента и характеристик высшего управления, включая содержательного лидера его компетентностного профиля начиная от наличия образования до области

деятельности на предыдущей должности. Формат области интересов и перечень компетенций содержательного лидера определяет не только политику в области развития организационной системы, но характеризует создание новых функциональных связей между собственной организационной системой и другими организационными системами [1-4], необходимыми для процессов развития и расширения области действия организационной системы. Таким образом, для реализации целей увеличения эффективности организационной системы и проведения процессов трансформации необходим организационный механизм мониторинга внутреннего потенциала организационной системы.

Теория, материалы, методы исследования и основные положения. Функциональное назначение организационных системы как первостепенная цель их существования обуславливает основные виды деятельности, создающие поток ценности, обращенный в вид разнородных результативности и не всегда имеющей финансовый эквивалент. Основной проблемой в процессах измерения функционального назначения организационных систем является вопрос: какие действия нужно предпринять по окончании исследования, и интерпретации данных, указывающих на необходимость реинжиниринга организационной системы и развёртывании процессов перехода к более конкурентным состояниям. Исходными атрибутами для инициирования процесса перехода являются определенные признаки, характеризующие базовую структуру организационной системы и систему метрик для измерения ее потенциала.

Гетерогенные организационные системы (табл. 1) определяют собственный функционал исходя из полученных основных данных о структуре и специфике той рыночной локации, на основной сегмент которой ориентирована целевая функция основных процессов организационной системы. Сложно-структурные и динамические связи охватывающие рынки сбыта отображают представление о потенциале рынка с неравномерным временным сдвигом, формируют эффект динамической конъюнктуры, возникающей из синергии макроэкономических явлений, включающих разнородные вызовы для научно-технического уровня развития исследуемой организационной системы, в которой происходит процесс создания ценности.

Таблица 1

Представление типологии организационных систем

Качество организованности структуры	Типология организационных систем
1	2
Вертикальная	Традиционная система, S
	Обучающаяся организация, SE
	Самообучающаяся организация, SA
	Бережливая система, SL
	Высокотехнологическая система, ST
Горизонтальная	Амбидекстерная, SR
	Система систем, SS
	Инновационная система, SI

В рамках инфокоммуникационных сетей, охвативших весь обозримо достижимый мир, организационные системы обладают связностью кооперативных целей по созданию добавленной стоимости, центром притяжения которых являются либо технологические конгломерации, либо ресурсные предпочтения. Основной целью организационной трансформации является научно-производственная доминанта в процессах экспансии на новые рынки сбыта основной продукции или расширение доли охвата на существующих позициях, используя стратегию постоянного совершенствования продукта или количественной диверсификации — это типовые механизмы для достижения подобных целей.

Таким образом необходим подход к разработке метода оценки потенциала организационной системы для осуществления подготовки к процессам трансформации организационной системы в соответствии с признаками диссипативности, присущими для состояний приближения к точке бифуркации и характерных для этого состояния условий перехода. Классификационные признаки разработаны в соответствии с укрупненным типовым рядом показателей, характеризующим классические организационные системы и производные их состояния, наиболее приближенные к уровню научно-технического развития отрасли и каналов коммуникации с основными эксплуатантами.

Существующие организационные системы сформированы по принципу измерения классификационных признаков, имеющих отношение к задачам и целям в области управления основным валовым продуктом организации. Верификация миссии организационной системы на предмет действительной результативности основных процессов это постоянная и совершенствуемая цель технологических визионеров и руководителей высшего звена для достижения состояния конкурентоспособности и выживаемости организационных систем. Основная концепция достижения целей постоянного мониторинга потенциала организационной системы заключается в разработке групп показателей, характеризующих гетерогенность организационных систем на основании учета степени достаточности количественных значений и присущих им признаков, используя итерационный механизм, основанный на применении авторской формы цикла Деминга-Шухарта (табл. 2). Последовательно применяя, модели управления знаниями для различных состояний системотехнических процессов организационных систем производственных предприятий, возможно, проводить измерения организационного потенциала и оценить степень готовности структурного подразделения и организационной системы в целом к трансформации или разворачиванию процессов перехода к более конкурентным состояниям.

Процессы декомпозиции и распаковки применяемых моделей управления знаниями это первостепенная цель любого исследования предназначенного для оценки потенциала организационных систем. Исследование практической функциональности используемых моделей управления

знаниями (табл. 3) необходимо для управления рисками при появлении таких эффектов как: организационное забывание или распад знания, что является соответствующими атрибутами для традиционных организационных систем, в которых реализован строго функционально-ориентированный подход к реализации основных процессов. Выбранная модель управления знаниями определяет детерминанты, учитывающие способность системы к развитию и изменению основных процессов, продуктов или услуг.

Таблица 2

Форма применения цикла Деминга – Шухарта

Процесс (Деятельность)	Метод измерения	Детерминанта
План		
1. Определить процесс и одно структурное подразделение	Расчетный	Один процесс с четким описанием
2. Выбрать показатели характерные для процесса	Экспертный	Выбрать от 2 до 6 показателей инновационного поведения
3. Провести опрос персонала на предмет преобладающей модели поведения	Социологический	100% персонала
4. Собрать процесс контроля по показателям результативности	Социологический	Не больше 3х показателей результативности
Процесс		
1. Создать анкеты под процесс и подразделение	Экспертный	100% персонала, 20 вопросов
2. Провести верификацию Альфой Кронбаха	Расчетный	80-100%
3. Провести анализ подразделения	Социологический	100% персонала, 20 вопросов
4. Обработать результат	Расчетный	Не более 1 дня
5. Сформировать гипотезу	Экспертный	Не более 5 гипотез
Контроль		
1. Верифицировать гипотезу с плановой целью исследования	Экспертный	Полное соответствие
2. Верифицировать цели исследования	Экспертный	Полное соответствие
3. Осуществить общий контроль морфологии результативности проведения опроса	Регистрационный	Не более 3-5% ошибок в общем количестве вопросов
Изменения		
1. Провести анализ неуправляемых ситуаций	Регистрационный	Не более 1-3 ситуаций
2. Ошибки и несоответствия в анкете	Регистрационный	Не более 3-5% ошибок в общем количестве вопросов
1. Внести изменения в структуру анкеты в соответствии с результатом исследования	Экспертный	Изменения не должны иметь 100% характер для прослеживаемости результатов исследования и формирования индекса

Таблица 3

Модели управления знаниями для форм и структур организационных систем

Формы структуры управления	Категории субъекта предпринимательства	По выпуску продукции	Модели управления знаниями
1. Линейная структура предприятия	Микропредприятие	Штучное, мелкосерийное	Модель Нонака и Такиучи. Модель Виига
	Малое предприятие	Штучное, мелкосерийное	Модель Нонака и Такиучи
2. Функциональная структура предприятия	Малое предприятие	Мелкосерийное	Модель Виига
	Среднее предприятие	Серийное, крупносерийное	Модель Хедлунда Модель Виига
3. Линейно-функциональная структура предприятия	Малое предприятие	мелкосерийное	Модель Виига
	Среднее предприятие	Серийное, крупносерийное	Модель Виига
	Крупное предприятие	Серийное, крупносерийное	Модель М. Эрла

4. Дивизиональная структура предприятия	Среднее предприятие	Серийное, крупносерийное, массовое	Модель Виига Модель М. Эрла
	Крупное предприятие	Серийное, крупносерийное, массовое,	Модель Хедлунда Модель М. Эрла
5. Матричная структура предприятия	Крупное предприятие	Серийное, крупносерийное, массовое	Модель Деспре и Шаувеля

Применение моделей управления знаниями основывается на по переменном использовании чётко выраженных механизмов и их особенностей реализации. Для тех организационных систем, в которых собственная корпоративная система управления процессами основана на механизмах обращения к моделям управления знаниями и применении авторской формы цикла Деминга-Шухарта необходимо внести дополнение в существующие процессы системы менеджмента качества для достижения устойчивого и конкурентного положения внутренних процессов создания ценности. Механизм выбора элемента или полнофункциональной модели управления знаниями осуществляется путем регламентации и формализации состояния процесса в соответствии с текущим уровнем зрелости и теми моделями, которые необходимы для реализации основных постулатов, направленных на содержание знания его обслуживания и накопления.

Основной проблемой в интеграции является последовательная актуализация моделей управления знаниями в соответствии с текущими тенденциями и актуальной научно-технической повесткой, регламентирующей существование номенклатуры производимой продукции и соответствующей комплектуемой ее части. Структурно механизм выбора элемента или полнофункциональной модели управления знаниями Q_M состоит из следующих элементов [9]:

$$Q_M = \{R_{ВФ}, R_{вф}, I_{ТТ}, I_{НТУ}, Q_{ЗП}\},$$

где $R_{ВФ}$ – внутренние факторы; $R_{вф}$ – внешние факторы; $I_{ТТ}$ – тренды и тенденции развития; $I_{НТУ}$ – научно-технический уровень организационной системы; $Q_{ЗП}$ – уровень зрелости процессов.

Содержательная декомпозиция Q_M представляется через кортеж состояний, определенный пятью показателями, отображающий достаточность потенциала для выбора модели, каждый из показателей составлен из иерархической последовательности, оцениваемой в эквиваленте пяти бальной квалитетической шкалы:

$$Q_M = \begin{cases} R_{ВФ} = (r_{ВФ1}, r_{ВФ2}, \dots, r_{ВФ5}), \\ R_{вф} = (r_{вф1}, r_{вф2}, \dots, r_{вф5}), \\ I_{ТТ} = (I_{ТТ1}, I_{ТТ2}, \dots, I_{ТТ5}), \\ I_{НТУ} = (I_{НТУ1}, I_{НТУ2}, \dots, I_{НТУ5}), \\ Q_{ЗП} = (Q_{ЗП1}, Q_{ЗП2}, \dots, Q_{ЗП5}). \end{cases}$$

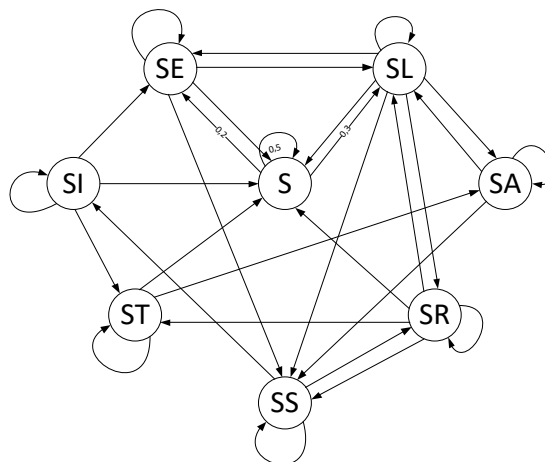
Выбор модели осуществляется путем проведения исследования структурного подразделения или организационной системы в целом, с применением авторской формы цикла Деминга-Шухарта, достаточность потенциала определяется верификацией бального рейтингового значения в соответствии с текущей ситуацией.

Модели управления знаниями являются частью общей системы структурной механики процесса приближения организационных систем к состоянию бифуркации Q_B , который включает в себя:

$$Q_B = \{Q_C, Q_3, Q_O, Q_{OTH}, Q_M\},$$

где Q_C – исходное состояние организационной системы; Q_3 – уровень зрелости организационной системы; Q_O – отличительная особенность организационной системы; Q_{OTH} – организационно-технологическая надёжность; Q_M – модель управления знаниями.

В основу трансформации сложных организационных систем, положен принцип итеративного перехода (рисунок) от текущего состояния к целевому состоянию в зависимости от потенциала системы, и тех факторов, которые оказывают наиболее предпочтительное влияние [9].



Модель итерационных циклов трансформации для типологий организационных систем

Результаты исследования и их обсуждение. Попеременно используя модели управления знаниями, в соответствии с актуальными концепциями, предлагающими корпоративную систему управления основными процессами, используя ситуативно выбранные модели, обозначающие механизм воздействия на процесс путём верификации используемого знания и сравнения существующей модели организации процессов структурных подразделений, создающих ценность [5-8] с актуальными требованиями, запросами и вызовами рынка. Для выбора рационального конкурентного положения, учитывающего не только тенденции в отрасли, но и внешние вызовы необходимо постоянно соответствовать в научно-технической политике.

Регулирование процессов мониторинга организационного потенциала предприятия может осуществляться в соответствии с обращением к результативности основных процессов составляющий основной валовый продукт, услуги или процессы организации. Такие форматы должны сопровождаться механизмами оценивания релевантности выпускаемого продукта научно-техническому уровню организации и требованиям рынка к техническому паритету производимого изделия, как одного из факторов внешней среды [4-7].

Для подобных задач используются модели управления устареванием, включающие разработанный перечень наименований моделей характерных для производимой продукции и услуг, включающих процессы жизненного цикла, основанные на принципах регламентированных [10, 11], и другими теоретико-методологическими основами, включающих описание деградации элементов как технических так и организационных систем связанных с морально-техническим устареванием. Интеграция или реинтеграции существующих моделей управления устареванием совместно с моделями управления знаниями позволит получить эффективный практический инструмент для управления организационно-технологической надежностью организационных систем предприятий.

В процессах макроэкономической турбулентности целесообразно не развивать научно-технологический потенциал, а исследовать внутренние возможности производственных систем на предмет сокращения издержек и установление фокуса на развитие технических параметров продукции в сторону унифицирования и увеличения функциональности технических систем, та же стратегия и характерна для организационных систем.

Таким образом, можно сформировать гипотезу что в период макроэкономической турбулентности базовая структуры организационной системы приобретает более стагнированный характер, обусловленный унификацией организационно-технологических характеристик без экспоненциального роста потребительских требований, что интерпретируется как состояние дрейфа значимых характеристик обусловленных использованием стратегии экономии на издержках и фокусировании на функционально-значимых параметрах системы для достижения целей стабильности и максимальной устойчивости в период нахождения под внешними воздействующими факторами.

Заключение. Таким образом, модели управления знаниями целесообразно применять для корректировки развития базовых структур организации в отношении используемых методов генерации и сохранения знаний, позволяющих в период динамического развития использовать накопленный потенциал и объём знаний для совершения технологического рывка. Следовательно, возникает состояние, когда можно реализовать морфологическое множество отличительных особенностей применяемых моделей управления знаниями и адаптировать их к текущим условиям среды. Таким образом, модели управления знаниями позволяют в короткий срок создать набор процедур для управления функцией развития базовой структурой

организационной системы путём унифицирования ее характеристик и обеспечения минимального набора функционально-достаточных и функционально-необходимых требований, удовлетворяющих текущим вызовам.

Гетерогенные организационные системы можно классифицировать по критериям и признакам управляемости и организованности. Детальным уточнением является применение моделей знаний, включая особый аппарат, используемый для экспресс-оценки или предварительной оценки потенциала организационных систем с целью выявления точек бифуркации, для осуществления трансформации организационной структуры и целей функционирования организации с помощью определённого ряда критериев [9] используемых, как механизм потенциального подбора для обновлённых целей и задач организационной системы, с учётом исследования конечного состояния.

Список литературы

1. Щукина Д.С. Методика прогнозирования потребительской ценности инновации // *Инновационное приборостроение*. 2024. Т. 3. № 5. С. 5-9.
2. Митягина М.Н. Квалиметрические шкалы для оценки показателей элементов организационной среды // В сборнике: *Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Сборник статей VI Международного форума*. Санкт-Петербург, 2024. С. 499.
3. Тихомирова А.Ю. Организационные патологии в управленческих решениях для коммерческих и некоммерческих организаций // В книге: *Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве. Сборник тезисов докладов III Международного форума*. В 2-х частях. Санкт-Петербург, 2023. С. 285-287.
4. Щеников Я.А. Обзор методов, используемых в инноватике // В книге: *Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. Пятая Всероссийская научная конференция. Сборник докладов*. Санкт-Петербург, 2024. С. 231-236.
5. Зубкова, Д.А., Гинцяк А.М. Структурное разделение стратегических взаимодействий по различным признакам // В сборнике: *Управление инновациями в условиях цифровой трансформации. сборник докладов Всероссийской студенческой учебно-научной конференции*. Санкт-Петербург, 2023. С. 98-102.
6. Фролова Е.А., Атрошенко С.А., Каплиева А.А. Методы управления рисками проекта // *Компетентность*. 2024. № 6. С. 37-41.
7. Тушавин В.А., Фролова Е.А., Чабаненко А.В. Квалиметрическая оценка качества цифровых двойников аддитивного производства // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. - 2023. Т. 25. № 6 (116). С. 84-91.

8. Мабхеш М. Поток создания потребительской ценности наукоемкого производства: методы и модели // Компетентность / Competency (Russia). 2023. № 9-10. С. 82-85.

9. Назаревич С.А. Системный анализ модели итерационных циклов трансформаций для типологий организационных систем // Системный анализ и логистика. 2024. № 5(43) (готовится к опубликованию).

10. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2021. 46 с.

11. ГОСТ Р 27.203-2012. Надежность в технике (ССНТ). Управление устареванием. М.: Стандартинформ. 2013. 29 с

Назаревич Станислав Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, albus87@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

KNOWLEDGE MANAGEMENT MODELS AND QUALIMETRIC DETERMINANTS FOR HETEROGENEOUS ORGANIZATIONAL SYSTEMS OF ENTERPRISES

S.A. Nazarevich

The article deals with the complementation of the classical typology of organizational systems based on management models of heterogeneous organizational systems. The peculiarities of the complementation are defined and the aim of the present study is verified, which represents the refinement of the typology of organizational systems and the definition of measurement methods and criteria for identifying the bifurcation state of organizational systems. Theoretical prerequisites for determining transition points between types of organizational systems initiated by external influencing factors are formed. The key revealing objectives of this research describe the impact factors of integrating knowledge management models with inherent determinants that consider the system's ability to develop and to evolve within the formed typology of organizational systems. Models with a certain content and decomposition for measuring the transition potential of an organizational system are developed and given, using the author's form of the classical Deming-Schuhart cycle, including stages of process activity, where measurement methods are specified and rational criteria for monitoring the process of change are defined, in order to simplify the use of this form in a structural unit. The elements necessary for measurement are interpreted in accordance with the regulated maturity level for the subsequent selection of a knowledge management model with the goals of presenting a more stable position of a structural unit or organizational system under external influencing factors. The system of structural mechanics of the process of approaching the bifurcation state of organizational systems is presented in the form of a meaningful decomposition of the knowledge management model described through a tuple of states, including five indicators that reflect the sufficiency of the potential of the organizational system to select a separate element or a full-functional knowledge management model, and to implement the process of integrating a new model or making a decision on reengineering the organizational system and transition to a more functional type on the basis of the general knowledge management model. Additional prerequisites for further research based on the use of obsolescence management models are considered, including the developed list of model names characteristic for manufactured products, services, life cycle processes.

Key words: organizational systems, transition points, organizational qualities, organizational systems functionality problems, processes, organizational capacity measurements.

Nazarevich Stanislav Anatolievich, candidate of technical sciences, docent, albus87@inbox.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

УДК 62-5

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-244-245

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЙ РОЗЛИВА НА ОСНОВЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Е.С. Квас

В работе предложен подход к прогнозированию срока службы роботизированных линий розлива напитков. Особое внимание уделено разработке эксплуатационных коэффициентов, отражающих ключевые факторы: стабильность производительности, соответствие регламенту графиков технического обслуживания и внешняя температура эксплуатации. На основе разработанных коэффициентов предложена математическая модель, использующая полиномиальный подход для анализа взаимодействий между эксплуатационными коэффициентами. Верификация модели показала точность в районе 91%, что подтверждает её пригодность для применения в системах предиктивного обслуживания и повышения надежности оборудования.

Ключевые слова: прогнозирование, срок службы, роботизированные линии, эксплуатационные параметры, техническое обслуживание, надёжность оборудования, производственные системы.

В условиях растущей автоматизации производственных процессов обеспечение стабильной работы роботизированных линий является одной из ключевых задач современных предприятий. Это особенно актуально для линий розлива напитков, где высокие требования к качеству продукции и минимизация простоев требуют непрерывного мониторинга и оперативной оптимизации работы оборудования. Сбои в работе таких линий могут привести к значительным потерям – как временным, так и финансовым, что делает задачу прогнозирования состояния оборудования и планирования профилактических мероприятий крайне важной.

Эффективное прогнозирование состояния оборудования позволяет своевременно выявлять отклонения и оперативно на них реагировать, минимизируя влияние на производственный процесс. Однако традиционные методы прогнозирования, основанные на стандартизированных моделях, зачастую не учитывают специфики нестандартизированных роботизированных линий розлива, где эксплуатационные условия и характеристики оборудования могут значительно отличаться от типичных производственных систем [1-5].

В данной работе предлагается разработка квалиметрической модели для комплексной оценки состояния и срока службы роботизированных линий розлива напитков. Основой этой модели являются предложенные эксплуатационные коэффициенты, позволяющие оценивать эффективность функционирования оборудования с учетом реальных условий эксплуатации. В отличие от классических моделей, ориентированных на анализ доступности и надежности оборудования, предлагаемая модель вводит дополнительные показатели, такие как стабильность производительности, частота технического обслуживания и температурный режим, что позволяет точнее прогнозировать срок службы оборудования и планировать профилактические мероприятия.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка и верификация квалиметрической модели для оценки срока службы роботизированной линии розлива напитков. Для достижения этой цели в рамках исследования были поставлены следующие задачи:

1. выделить и формализовать ключевые эксплуатационные коэффициенты, которые будут отражать состояние оборудования и его производительность в реальных условиях эксплуатации;
2. разработать подход к комплексной оценке функционирования линии на основе этих коэффициентов, позволяющий учитывать как текущую стабильность работы, так и динамику износа оборудования;
3. построить математическую модель, описывающую зависимость срока службы оборудования от эксплуатационных коэффициентов и производственных параметров с учетом возможных нелинейных взаимодействий между ними;
4. провести анализ и моделирование с использованием программных инструментов *Python*, таких как *numpy*, *scipy* и *matplotlib*, для расчета коэффициентов модели и визуализации результатов;
5. оценить точность и адекватность модели, используя коэффициент детерминации R^2 и анализ остатков, чтобы подтвердить её соответствие реальным данным и способность прогнозировать срок службы оборудования.

Комплексная оценка функционирования линии розлива основана на интеграции нескольких эксплуатационных коэффициентов, которые количественно описывают стабильность производительности, частоту обслуживания и температурный режим эксплуатации. Такой подход позволяет получать полное представление о состоянии линии и прогнозировать её износ. Это обеспечивает возможность интеграции модели для планирования профилактического обслуживания и повышения надежности производственного процесса [6-9].

3. Материалы и методы. Для разработки модели были предложены три эксплуатационных коэффициента, которые необходимо исследовать и оценить с точки зрения возможности с их применением прогнозировать срок службы и изменения качества функционирования линии.

Коэффициент стабильности производительности $K_{сп}$ введен для учета реальной производительности линии относительно номинальной. Он рассчитывается по формуле:

$$K_{сп} = \frac{P_{ф}}{P_{ном}},$$

где $P_{ф}$ – фактическая производительность линии, ед./ч; $P_{ном}$ – номинальная производительность линии, ед./ч.

Значения коэффициента $K_{сп}$, близкие к 1, указывают на устойчивую работу линии, в то время как отклонения свидетельствуют о снижении производительности или наоборот – о превышении номинальных параметров, что может свидетельствовать о повышенном износе компонентов линии.

Следующий коэффициент – коэффициент технического обслуживания $K_{то}$ который характеризует состояние оборудования с точки зрения соблюдения регламентов обслуживания. Он отражает соотношение между фактическим временем наработки до проведения технического обслуживания и максимальным временем работы линии без обслуживания, установленным производителем.

Этот коэффициент позволяет оценить, насколько строго соблюдаются требования по регламентному обслуживанию и выявить признаки ускоренного износа компонентов. Например, если по регламенту обслуживание необходимо проводить раз в год, но фактически оно было выполнено дважды за тот же период, это может указывать на повышенный износ оборудования.

Коэффициент $K_{то}$ оценивается исходя из следующего соотношения:

$$K_{то} = \frac{t_{факт\ т.о.}}{t_{макс\ рекомендуемое}},$$

где $t_{факт\ т.о.}$ – фактическое время наработки до регламентного обслуживания, ч; $t_{макс\ рекомендуемое}$ – время наработки до регламентного обслуживания, установленное производителем, ч.

Значения коэффициента интерпретируются следующим образом:

- при $K_{то} = 1$ фактическая наработка достигает установленного производителем предела, это указывает на работу оборудования в условиях, близких к максимально допустимым;

- при $K_{то} > 1$ фактическая наработка превышает рекомендуемые производителем значения, это свидетельствует о том, что оборудование эксплуатируется сверх нормы, что повышает риск ускоренного износа и отказов;

- при $K_{то} < 1$ оборудование либо находится в хорошем состоянии и используется менее интенсивно, чем допускает регламент, либо обслуживается заранее для предотвращения возможных поломок, часто это происходит в условиях повышенной нагрузки или агрессивной окружающей среды (например, высокая влажность или температура), где профилактическое обслуживание проводится чаще для снижения рисков износа.

Третьим показателем введен коэффициент температурной стабильности $K_{тс}$, который позволяет охарактеризовать влияние температурного режима на износ оборудования, что особенно критично при работе в условиях высоких нагрузок. Поддержание оптимальной температуры эксплуатации является важным фактором для продления срока службы оборудования и снижения риска его отказов.

Данный коэффициент рассчитывается как отношение средней рабочей температуры к оптимальной температуре эксплуатации:

$$K_{тс} = \frac{\theta_{ср}}{\theta_{опт}},$$

где $\theta_{ср}$ – средняя рабочая температура оборудования при текущей нагрузке, К; $\theta_{опт}$ – оптимальная температура эксплуатации, рекомендованная производителем, К.

Значение $K_{тс} = 1$ или близко к 1 указывает на то, что оборудование работает при оптимальной температуре, что минимизирует износ и обеспечивает максимальный срок службы.

Значения $K_{тс} < 1$ означают, что оборудование работает при температуре ниже оптимальной. В таком случае температурные условия не оказывают негативного влияния на срок службы оборудования и даже могут способствовать его продлению.

$K_{тс} > 1$ указывает на превышение оптимальной температуры, что может привести к перегреву, ускоренному износу и снижению срока службы оборудования.

Разработка математической модели. Для прогнозирования срока службы L на основе эксплуатационных коэффициентов $K_{сп}$, $K_{то}$ и $K_{тс}$ предлагается использовать регрессионный анализ второго порядка. Это позволяет учесть как линейные, так и нелинейные зависимости между эксплуатационными показателями и сроком службы оборудования, что особенно важно для учета сложных взаимосвязей в условиях нестандартизированного производства.

В таком случае, для рассматриваемого объекта исследования, представленного в качестве роботизированной линии розлива, математическая модель будет иметь следующий вид:

$$L = C_0 + C_1 K_{сп} + C_2 K_{то} + C_3 K_{тс} + C_4 K_{сп}^2 + C_5 K_{то}^2 + C_6 K_{тс}^2 + \varepsilon,$$

где L – прогнозируемый срок службы оборудования, ч; $C_0, C_1, \dots, C_6$ – коэффициенты регрессии, определяемые в ходе эксплуатационного анализа; ε – случайная ошибка модели, отражающая влияние неконтролируемых факторов.

Квадратичные члены позволяют учесть нелинейные зависимости между эксплуатационными коэффициентами и сроком службы, что повышает точность предсказания.

Предлагаемая модель предполагает, что значения эксплуатационных коэффициентов $K_{сп}^2$, $K_{то}^2$ и $K_{тс}^2$ позволяют учесть нелинейное влияние эксплуатационных параметров на срок службы оборудования. Это важно, так

как изменение коэффициентов может оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на долговечность в зависимости от их уровня.

Для обеспечения более высокой точности прогнозирования срока службы роботизированной линии розлива напитков разработка модели требует учёта взаимосвязей между эксплуатационными коэффициентами и их влиянием на состояние оборудования, что может быть реализовано следующей формой модели:

$$L = C_0 + C_1 K_{\text{сп}} + C_2 K_{\text{то}} + C_3 K_{\text{тс}} + C_4 K_{\text{сп}}^2 + C_5 K_{\text{то}}^2 + C_6 K_{\text{тс}}^2 + C_7 K_{\text{сп}} K_{\text{то}} + C_8 K_{\text{сп}} K_{\text{тс}} + C_9 K_{\text{то}} K_{\text{тс}} + \varepsilon,$$

где C_0 – базовый срок службы оборудования без учета эксплуатационных факторов; C_1, C_2, C_3 – весовые коэффициенты, указывающие на линейное влияние $K_{\text{сп}}, K_{\text{то}}, K_{\text{тс}}$ на срок службы, например, положительное значение C_1 предполагает, что повышение стабильности производительности увеличивает срок службы, аналогично, C_2 , и C_3 показывают влияние частоты технического обслуживания и температурного режима соответственно; C_4, C_5, C_6 – коэффициенты квадратичных членов, отражающих нелинейное влияние каждого параметра на срок службы, которые позволяют учесть нелинейное влияние каждого коэффициента на срок службы, например, при росте $K_{\text{сп}}$ сначала может наблюдаться положительный эффект на срок службы, но при слишком высоких значениях перегрузка оборудования может привести к его ускоренному износу, квадратичные члены также помогают выявить пороговые значения, за которыми влияние коэффициента становится негативным; C_7, C_8, C_9 – коэффициенты взаимодействия, описывающие совместное влияние пары коэффициентов, например C_7 , отражает влияние одновременного увеличения стабильности производительности и частоты обслуживания, это позволяет понять, как частое обслуживание при высокой производительности влияет на износ оборудования; C_8 , учитывает совместное влияние стабильности производительности и температурного режима, например, стабильная работа при высоких температурах может ускорить износ компонентов; C_9 показывает, как взаимодействие между частотой обслуживания и температурным режимом влияет на срок службы; ε – случайная ошибка модели, включающая факторы, которые не были учтены в модели, но могут оказывать влияние на срок службы.

Для определения значений коэффициентов $C_0, C_1, \dots, C_9$ используется метод наименьших квадратов (МНК), который минимизирует сумму квадратов отклонений между фактическими значениями срока службы (L_i) и прогнозируемыми значениями, рассчитанными по модели. Это позволяет получить оптимальные значения коэффициентов, обеспечивающие наилучшее соответствие модели реальным данным. Расчёты проводились с использованием библиотеки *numpy* в *Python*, что позволило ускорить процесс вычислений и повысить точность оценок [10-16].

Корректность применения МНК для нашей модели обусловлена тем, что используется модель второго порядка для аппроксимации зависимости

срока службы от эксплуатационных коэффициентов. МНК позволяет оценить коэффициенты $C_0, C_1, \dots, C_9$ модели, минимизируя отклонения между фактическими и предсказанными значениями срока службы, что даёт научно обоснованные и стабильные оценки при наличии достаточного количества данных.

Однако важно помнить, что МНК требует соблюдения ряда условий:

- 1) хотя модель включает квадратичные и взаимодействующие члены, параметры C_i остаются линейными;
- 2) метод работает лучше, если ошибки имеют нормальное распределение;
- 3) данные должны быть собраны так, чтобы каждое наблюдение было независимым от других, что обычно соблюдается для временных данных эксплуатации.

После определения значений коэффициентов $C_0, C_1, \dots, C_9$ для каждого необходимо провести статистическую проверку, для гипотезы $H_0: C_i = 0$, где $i = 1, \dots, 9$, о есть нулевая гипотеза предполагает, что коэффициент C_i не оказывает значимого влияния на прогнозируемый срок службы оборудования. Отрицание этой гипотезы означает, что соответствующий коэффициент оказывает существенное влияние на срок службы.

Для оценки значимости каждого коэффициента применяется T -статистика, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$T_i = \frac{C_i}{SE(C_i)},$$

где C_i – значение i -го коэффициента модели, полученное в результате регрессионного анализа; $SE(C_i)$ – стандартная ошибка оценки коэффициента C_i , отражающая степень разброса коэффициента вокруг его истинного значения, рассчитывается на основе дисперсии остатков и количества наблюдений, что позволяет оценить точность полученных коэффициентов.

После расчёта T -статистики необходимо интерпретировать её результат через p -значение – то есть вероятность того, что наблюдаемое значение T -статистики (или более экстремальное значение) могло бы быть получено случайно, при условии, что нулевая гипотеза ($H_0: C_i = 0$) верна. Здесь вводится уровень значимости ошибки отрицания нулевой гипотезы через критическое значение α – это заранее установленный уровень значимости, который используется для принятия решения о том, следует ли отвергнуть нулевую гипотезу H_0 . Обычно выбирается значение $\alpha = 0,05$, что соответствует уровню доверия 95%. При таком выборе это означает, готовность допустить вероятность ошибки первого рода (отвергнуть нулевую гипотезу, когда она на самом деле верна) на уровне 5%, что представляется оправданным в контексте объекта моделирования.

Если $|T_i|$ больше критического значения α или p -значение меньше α , то гипотеза H_0 отвергается, что указывает на статистическую значимость

коэффициента C_i . При этом p -значение – это вероятность наблюдения значений T_i , равных или более экстремальных, при условии истинности гипотезы H_0 : $C_i = 0$; p -значение позволяет количественно оценить силу доказательств в пользу гипотезы H_1 : $C_i \neq 0$. Чем меньше p -значение, тем менее вероятно, что наблюдаемый эффект обусловлен случайностью.

Квалиметрический подход в применении к роботизированной линии розлива позволяет количественно оценить качество и надёжность её работы с помощью трёх ключевых эксплуатационных коэффициентов: $K_{сп}$ (стабильность производительности), $K_{то}$ (частота обслуживания) и $K_{тс}$ (температурный режим). Эти коэффициенты отражают стабильность работы оборудования, необходимость его обслуживания и влияние температурных условий, что позволяет судить о его состоянии и способности поддерживать требуемый уровень производительности.

Для проведения квалиметрической оценки можно определить вклад каждого эксплуатационного коэффициента в прогнозируемый срок службы оборудования (L) с учётом весового значения, выраженного соответствующим коэффициентом C_i . Это позволяет выявить, какой из эксплуатационных факторов оказывает наибольшее влияние на срок службы оборудования и, таким образом, более эффективно планировать мероприятия по обслуживанию.

Для оценки вклада каждого нормированного эксплуатационного коэффициента можно использовать следующую формулу:

$$V_i = \frac{(C_i \cdot K_i)}{\sum_{j=1}^n (C_j \cdot K_j)},$$

где V_i – доля вклада i -го коэффициента в общий срок службы; C_i – весовой коэффициент для i -го эксплуатационного параметра; K_i – нормированное значение i -го эксплуатационного коэффициента; n – общее количество коэффициентов, используемых в модели.

Значение V_i отражает относительную важность каждого фактора в модели, что помогает более точно определить, на какие эксплуатационные параметры следует обращать внимание для увеличения срока службы и повышения надёжности оборудования.

Помимо этого, коэффициенты взаимодействия C_7 , C_8 , C_9 также могут быть интерпретированы в рамках квалиметрического подхода, так как они оценивают совокупное влияние двух факторов на срок службы.

Для оценки вклада коэффициентов взаимодействия в общий срок службы можно использовать аналогичный подход. Вклад коэффициентов взаимодействия можно выразить следующим образом:

$$V_{ij} = \frac{C_{ij}(K_j \cdot K_i)}{\sum_{k=1}^n (C_k \cdot K_k) + \sum_{l=1}^m (C_{lm}(K_l \cdot K_m))},$$

где V_{ij} – доля вклада взаимодействия между коэффициентами K_i и K_j ; C_{ij} – коэффициент взаимодействия для пары факторов; K_i и K_j – нормированные значения соответствующих эксплуатационных коэффициентов; n – количество основных коэффициентов; m – количество коэффициентов взаимодействия.

Используя стандартные подходы, применяемые при оценке качества и надёжности промышленных систем, а также обобщённые данные по надёжности оборудования, можно выделить типовые пороговые значения для эксплуатационных коэффициентов. Эти данные позволяют более точно моделировать и оценивать срок службы оборудования.

Для того чтобы оценить состояние оборудования на основе эксплуатационных коэффициентов, используется система пороговых значений, которые позволяют определить уровень качества работы роботизированной линии розлива. Шкала оценки основана на пятибалльной системе, где каждому баллу соответствует определённое состояние оборудования – от «отличного» до «критического». В таблице 1 представлены типовые пороговые значения для коэффициентов разработанных коэффициентов. Эти значения позволяют стандартизировать процесс оценки и наглядно определить, какие аспекты эксплуатации требуют внимания и возможной корректировки.

Таблица 1

**Пороговые значения эксплуатационных коэффициентов
для оценки состояния оборудования**

Балл	Описание	$K_{сп}$	$K_{то}$	$K_{тс}$
5	Отличное состояние: оборудование работает в оптимальном режиме, отклонения минимальны и не требуют корректировки	$0,95 \leq K_{сп} \leq 1,05$	$0,9 \leq K_{то} \leq 1,1$	$0,95 \leq K_{тс} \leq 1,05$
4	Хорошее состояние: небольшие отклонения от оптимальных значений, не влияющие на работу, но требующие периодического мониторинга	$0,9 \leq K_{сп} < 0,95$ или $1,05 < K_{сп} \leq 1,1$	$0,8 \leq K_{то} < 0,9$ или $1,1 < K_{то} \leq 1,2$	$0,90 \leq K_{тс} < 0,95$ или $1,05 < K_{тс} \leq 1,1$
3	Удовлетворительное состояние: отклонения допускаются, но могут указывать на начало износа, требуется диагностика	$0,8 \leq K_{сп} < 0,9$ или $1,1 < K_{сп} \leq 1,2$	$0,7 \leq K_{то} < 0,8$ или $1,2 < K_{то} \leq 1,3$	$0,80 \leq K_{тс} < 0,9$ или $1,1 < K_{тс} \leq 1,2$
2	Неудовлетворительное состояние: значительные отклонения, риск отказа, требуется вмешательство	$0,7 \leq K_{сп} < 0,8$ или $1,2 < K_{сп} \leq 1,3$	$0,6 \leq K_{то} < 0,7$ или $1,3 < K_{то} \leq 1,5$	$0,7 \leq K_{тс} < 0,8$ или $1,2 < K_{тс} \leq 1,3$
1	Критическое состояние: оборудование подвержено высокому риску отказа, требуется немедленное вмешательство	$K_{сп} < 0,7$ или $K_{сп} > 1,30$	$K_{то} < 0,6$ или $K_{то} > 1,5$	$K_{тс} < 0,7$ или $K_{тс} > 1,3$

В таблице 1 можно увидеть использование диапазонов с «или», что позволяет учитывать различные эксплуатационные ситуации и адаптировать модель к реальным условиям эксплуатации. Это не является противоречием, а скорее отражает реальность, в которой оборудование может сталкиваться с разными проблемами в зависимости от условий работы.

Итоговая оценка состояния оборудования может быть представлена как среднее арифметическое значений, полученных по трём ключевым эксплуатационным коэффициентам. Такая агрегированная оценка позволяет получить обобщённое представление о текущем состоянии оборудования и его надёжности.

Моделирование и анализ результатов. В данном исследовании объектом является роботизированная линия розлива напитков, включающая автоматизированные узлы и механизмы, отвечающие за наполнение, закупку, упаковку и перемещение продукции. Особенностью линии являются значительные вариации в нагрузках и температурных условиях, что требует учёта нескольких эксплуатационных параметров для более точного прогнозирования срока службы.

Основными эксплуатационными параметрами в контексте модели являются:

- производительность линии, которая определяется как фактический объём продукции, обрабатываемой за единицу времени;
- частота регламентного и фактического обслуживания оборудования;
- температурные условия эксплуатации.

Цель моделирования – спрогнозировать срок службы L роботизированной линии, учитывая влияние предложенных эксплуатационных коэффициентов.

Для обеспечения корректного построения модели были введены следующие условия и допущения:

1) предполагается, что влияние каждого эксплуатационного коэффициента $K_{сп}$, $K_{то}$, $K_{тс}$ на срок службы оборудования описывается линейными и квадратичными функциями, а также их взаимодействиями;

2) для упрощения анализа принято, что эксплуатационные параметры не изменяются значительно в течение одного периода работы, то есть на временных промежутках, для которых собираются данные, параметры остаются относительно постоянными;

3) каждое наблюдение по сроку службы считается независимым, что позволяет использовать метод наименьших квадратов для оценки коэффициентов регрессионной модели;

4) отклонения от модели предполагаются нормально распределёнными, что позволяет проводить анализ остатков и проверку гипотез с применением методов параметрической статистики;

5) предполагается, что значения коэффициентов $K_{сп}$, $K_{то}$, $K_{тс}$ получены с достаточной точностью, что минимизирует влияние ошибок измерений на модель;

6) коэффициент C_0 представляет собой свободный член в уравнении регрессии, то есть это базовый уровень срока службы, который модель предсказывает при минимальных значениях других коэффициентов и его величина важна для начальной точки отсчета срока службы, но слишком высокое значение может указывать на необходимость перенастройки модели.

В качестве объекта в модели рассматривается автоматизированная линия розлива газированных напитков, работающая в типичных для промышленного производства условиях. Линия спроектирована для выполнения операций розлива при стабильной производительности около $90,000 \pm$

10% единиц в час. Для поддержания заявленного производителем срока службы в 10 лет, выполняются регулярные мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту.

Температурные условия эксплуатации поддерживаются в диапазоне от 280 до 320 К, что соответствует типичным условиям производственных помещений такого характера.

Базовая зависимость срока службы оборудования (L) от эксплуатационных коэффициентов моделируется с учетом отклонений от оптимальных значений ($K=1$). Для этого в модель были введены дополнительные переменные:

$$abs\_K\_sp\_dev = |K_{сп} - 1|,$$

$$abs\_K\_to\_dev = |K_{то} - 1|,$$

$$abs\_K\_ts\_dev = |K_{тс} - 1|.$$

Параметр базового срока службы L_0 при оптимальных условиях определен как стандартный срок службы в размере десяти лет для данного оборудования, что с учетом смен и плотности работы линии составляет около 58 000 часов.

Для стабилизации модели была использована регуляризация Ridge с коэффициентом регуляризации $\alpha=10$. Регуляризация Ridge (или гребневая регрессия) – это метод машинного обучения, используемый для улучшения качества линейной регрессии, особенно в случаях, когда данные имеют сильную мультиколлинеарность, что позволяет избежать переобучения и уменьшить влияние мультиколлинеарности между признаками в некоторых случаях.

Начальные данные для моделирования были предоставлены инженерно-техническим персоналом, работающим с оборудованием типа KUKA, ABB и Fanuc. Данные включали значения производительности, наработки до технического обслуживания и рабочей температуры.

Далее модель была обучена на выборке из 2000 наблюдений, включающих различные диапазоны параметров, влияющих на вычисление коэффициентов ($K_{сп}$, $K_{то}$, $K_{тс}$) основанных на начальных данных, представленных в таблице 2. Следует отметить, что данные носят приблизительный характер, однако они были близки к реальным значениям по экспертным оценкам специалистов. Начальные данные для моделирования представлены в Таблице 2, где указаны начальные параметры, на основе которых проводился расчет эксплуатационных коэффициентов. Для улучшения обучаемости и устранения недостатков данных, модель была дополнена значениями коэффициентов в диапазонах 0,8-0,9 и 1,2-1,3.

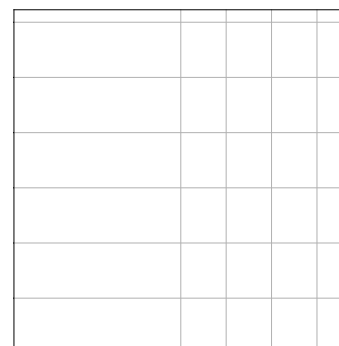
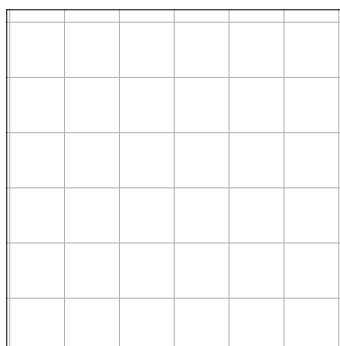
На рисунке 1 представлены зависимости прогнозируемого срока службы оборудования линии от трех исследуемых эксплуатационных коэффициентов.

Из графиков рис. 1 видно, что отклонение коэффициентов в обе стороны – как увеличение, так и уменьшение – приводит к заметному снижению срока службы оборудования.

Таблица 2

Начальные параметры модели и данные об эксплуатации оборудования

$P_{\text{ф шт./час}}$	$P_{\text{ном, шт./час}}$	$t_{\text{факт, час}}$	$t_{\text{макс т.о., час}}$	$\theta_{\text{ср, К}}$	$\theta_{\text{опт, К}}$
90488	90000	3943	3840	302	298
92152		3843		313	
91028		3857		295	
90449		3775		304	
89237		3882		292	
91459		3791		305	
89376		3873		295	
93918		3751		312	
94637		3748		316	
88834		3825		329	



02

Рис. 1. С моделированная зависимость срока службы роботизированной линии розлива от эксплуатационных коэффициентов (слева для коэффициента $K_{\text{сн}}$, посередине для коэффициента $K_{\text{мо}}$, справа для коэффициента $K_{\text{мс}}$)

На рисунке 2 представлены два графика, иллюстрирующие распределение остатков модели. Слева расположен график квантиль-квантиль, используемый для проверки соответствия распределения остатков нормальному закону. На этом графике наблюдаемые квантильные значения остатков сопоставлены с теоретическими квантильными значениями нормального распределения. Большинство точек располагается вдоль прямой линии $y = x$, что подтверждает близкое соответствие распределения остатков нормальному. Незначительные отклонения на краях графика могут быть обусловлены редкими наблюдениями, которые не оказывают существенного влияния на качество модели.

Справа представлена гистограмма распределения остатков, позволяющая визуализировать частотное распределение ошибок модели. График демонстрирует симметричное распределение остатков, близкое к нормальному. Высокая частота значений остатков около нуля свидетельствует о том, что модель предсказывает значения целевой переменной с высокой точностью.

Оба графика на рисунке 2 подтверждают корректность допущений линейной регрессии, что подчеркивает надежность и устойчивость предложенной модели для прогнозирования срока службы оборудования.

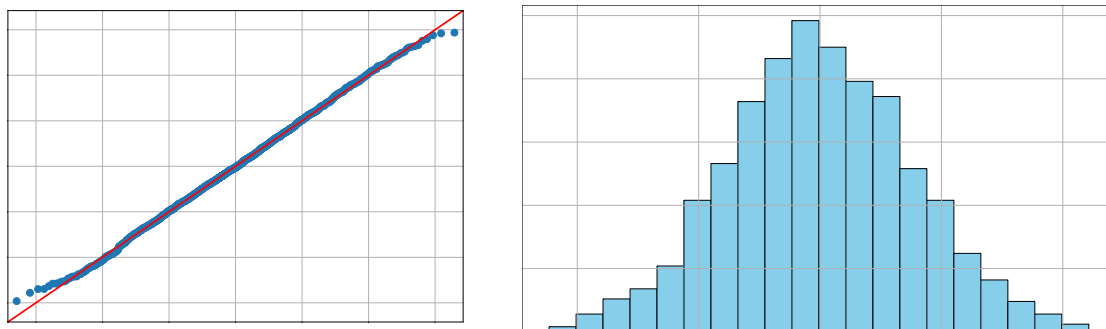


Рис. 2/ Графики анализа адекватности модели по распределению остатков, где слева – график проверки нормальности распределения, справа – гистограмма распределения остатков

Предложенная модель прогнозирования срока службы оборудования продемонстрировала высокую точность, о чем свидетельствует коэффициент детерминации $R^2 = 0,916$. Это означает, что модель объясняет более 91% вариации срока службы на основе предлагаемых эксплуатационных коэффициентов.

Сложности в сборе данных представляют одну из ключевых проблем при практическом применении модели. Эксплуатационные коэффициенты требуют регулярного мониторинга производственных параметров, таких как фактическая производительность, интервалы между техническими обслуживаниями и температурный режим работы. Сбор этих данных в промышленных условиях затруднен из-за необходимости внедрения систем автоматического контроля и анализа. Кроме того, из-за вариативности условий эксплуатации различных узлов линии может быть сложно учитывать индивидуальные особенности каждого компонента.

С учетом этих ограничений целесообразно применять модель не ко всей линии в целом, а к отдельным узлам или модулям оборудования. Такой подход позволит более точно учитывать локальные эксплуатационные параметры и снизить общую погрешность прогнозов. Например, узлы, подверженные высокой нагрузке или работающие в агрессивной среде, могут требовать индивидуальной калибровки модели.

Несмотря на ограничения, модель демонстрирует высокую устойчивость и может являться хорошим инструментом для прогнозирования срока службы оборудования в рамках типовых эксплуатационных условий. Дальнейшая адаптация модели может включать расширение числа учитываемых параметров и разработку специализированных подходов для отдельных модулей производственной линии.

Заключение. В данной работе была предложена квалиметрическая модель оценки эксплуатационных коэффициентов роботизированной линии розлива напитков и прогнозирования на их основе срока службы линии.

Результаты анализа, представленные в графической форме, подтверждают, что оптимальное значение коэффициентов ($K = 1,00$) обеспечивает максимальный срок службы, в то время как отклонения в любую сторону ведут к его снижению. Проведенная проверка нормальности распределения остатков показала, что они распределены близко к нормальному закону, что подтверждает адекватность модели.

Основным преимуществом модели является её способность учитывать реальные условия эксплуатации оборудования, что позволяет не только прогнозировать срок службы с достаточной точностью ($R^2 = 0,916$), на основе чего можно, например, планировать профилактические мероприятия.

Тем не менее, модель имеет свои ограничения. Трудности в сборе данных, такие как необходимость регулярного мониторинга эксплуатационных параметров, ограничивают возможность её масштабного внедрения. Кроме того, учёт вариативности условий эксплуатации отдельных узлов линии требует индивидуальной калибровки модели. В связи с этим предложено применять модель для прогнозирования срока службы отдельных модулей линии, что позволит повысить её точность и адаптивность к реальным условиям эксплуатации.

Практическая ценность модели заключается в возможности её использования в системах автоматизированного управления техническим обслуживанием и ремонтом. Модель может быть внедрена для предиктивного обслуживания, позволяя заранее выявлять узлы оборудования, находящиеся в зоне риска. Особенно актуальным является применение разработанного подхода и модели на основе эксплуатационных коэффициентов в условиях интенсивного использования оборудования.

В отличие от классических методов, опирающихся на усредненные или стандартизированные модели, предложенная методология интегрирует полиномиальную регрессию второго порядка, что даёт возможность описания сложных нелинейных взаимодействий между эксплуатационными коэффициентами

Таким образом, несмотря на ограничения, модель обладает высокой устойчивостью и может быть использована для планирования профилактических мероприятий, снижения рисков отказов оборудования и повышения надежности производственных процессов. В перспективе возможна доработка модели с учётом дополнительных факторов эксплуатации, таких как вибрации, влажность или агрессивная среда.

Список литературы

1. Guo, R., Peng, Y., Wan, A. Communication Equipment Maintenance Decision Method Based on Equivalent Service Coefficient // DEStech Transactions on Materials Science and Engineering. 2021. DOI: [10.12783/DTMSE/AMEME2020/35588](https://doi.org/10.12783/DTMSE/AMEME2020/35588).

2. Равин А. А., Хруцкий О. В. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2018. №1. С. 33–47.

3. Панков А. П., Панков Д. А., Похабов Ю. П., Панков И. А. Перспективы использования FMEA-анализов для высокоответственных технических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №3. С. 26–31. DOI: [10.24412/2071-6168-2024-3-26-27](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-3-26-27).

4. Li, X., Mba, D., Okoroigwe, E., Lin, T. Remaining service life prediction based on gray model and empirical Bayesian with applications to compressors and pumps // Quality and Reliability Engineering International. 2020. Vol. 37. P. 681–693. DOI: [10.1002/qre.2756](https://doi.org/10.1002/qre.2756).

5. Deng, Z., Tian, S., Xu, W., Lu, J., Hu, Y. A digital twin-driven dynamic prediction method for robotized production line operational performance // 2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2022. P. 1222–1227. DOI: [10.1109/ICIEA54703.2022.10006259](https://doi.org/10.1109/ICIEA54703.2022.10006259).

6. Yang, Q., Li, X., Cai, H., Hsu, Y., Lee, J., Yang, C., Li, Z., Lin, M. Fault prognosis of industrial robots in dynamic working regimes: Find degradation in variations // Measurement. 2020. P. 108545. DOI: [10.1016/j.measurement.2020.108545](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108545).

7. Stuhlenmiller, F., Clever, D., Rinderknecht, S., Lutter, M., Peters, J. Trajectory Optimization of Energy Consumption and Expected Service Life of a Robotic System // 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). 2021. P. 842–847. DOI: [10.1109/AIM46487.2021.9517539](https://doi.org/10.1109/AIM46487.2021.9517539).

8. Zhang, J., Dai, Y., Xiao, Y. A model for remaining useful life prediction of rolling bearings based on the IBA-FELM algorithm // Measurement Science and Technology. 2023. Vol. 35. (Meas. Sci. Technol. 35 035021). DOI: [10.1088/1361-6501/ad15dc](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad15dc).

9. Острейковский В. А., Сорочкин А. В. Модели и методы статистической теории надежности в развитии концепции уровней описания старения оборудования сложных систем с длительными сроками активного существования // Надежность и качество сложных систем. 2022. №3 (39). С. 5–15.

10. Harris, C. R. et al. Array programming with NumPy // Nature. 2020. DOI: [10.1038/s41586-020-2649-2](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2).

11. Bauer, M., Garland, M. Legate NumPy: accelerated and distributed array computing. In Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 23, P. 1–23. Doi.org/[10.1145/3295500.3356175](https://doi.org/10.1145/3295500.3356175)

12. Сауатай А., Рыстыгулова В. Б. Использование Python для решения научно-технических задач // Евразийский научный журнал. 2023. №8. С. 10–16.

13. Родионов А. С., Мухаметзянов Э. В., Курбангалиев А. М., Исламгулов Р. Р. Программно-аппаратный комплекс для мониторинга показаний датчиков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. №1. С. 66–71.

14. Ильичев В. Ю., Юрик Е. А., Медов Д. С. Решение дифференциальных уравнений в частных производных с использованием функций языка Julia // E-Scio. 2022. №2 (65). С. 251–260.

15. Gorman, N., Bruce, A., MacGill, I. Numpy: A Python package for modelling the Australian National Electricity Market dispatch procedure // J. Open Source Softw. 2022. Vol. 7. P. 3596. DOI: [10.21105/joss.03596](https://doi.org/10.21105/joss.03596).

16. Ziogas, A., Ben-Nun, T., Schneider, T., Hoefler, T. NPBench: a benchmarking suite for high-performance NumPy. In Proceedings of the 35th ACM International Conference on Supercomputing (ICS '21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 63–74. [Doi.org/10.1145/3447818.3460360](https://doi.org/10.1145/3447818.3460360)

Квас Евгений Станиславович, аспирант, старший преподаватель, E.kvas@guap.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

PREDICTION OF THE SERVICE LIFE OF ROBOTIZED FILLING LINES BASED ON OPERATIONAL COEFFICIENTS

E.S. Kvas

The article presents an approach to predicting the service life of robotized filling lines for beverages. Special attention is given to the development of operational coefficients that reflect key factors such as performance stability, compliance with maintenance schedules, and operating temperature conditions. Based on the developed coefficients, a mathematical model is proposed, using a polynomial approach to analyze the interactions between the operational coefficients. The verification of the model showed an accuracy of about 91%, which confirms its suitability for application in predictive maintenance systems and improving the reliability of equipment.

Key words: prediction, service life, robotized lines, operational parameters, maintenance, equipment reliability, production systems.

Kvas Evgeny Stanislavovich, postgraduate, senior lecturer, E.kvas@guap.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP)

УДК 658.56

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-259-260

ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ОБКАТНОГО ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

А.А. Маликов, С.М. Никольский

В данной статье приводится пример применения функционально-стоимостного анализа (ФСА-анализа) с целью обоснования применения координатно-измерительных машин для контроля качества параметров зубчатых колес и обкатного зуборезного инструмента. Определены минимальные и дополнительные требования для контроля зубчатых колес. Выполнен стоимостной анализ ручных по степени автоматизации, узкоспециализированных и универсальных средств измерений, необходимых для контроля качества изготовления зубчатых колес.

Ключевые слова: ФСА-анализ, качество, зубчатое колесо, обкатной зуборезный инструмент.

В настоящее время, в связи с развитием цифровых технологий, и введением стандартов на цифровые двойники, цифровое производство, цифровые модели и т.п., более востребованными должны становиться методики контроля изделий, позволяющие интегрировать результаты своей деятельности непосредственно в автоматизированную систему управления производством (АСУП или САМ) типа «Лощман: PLM» от ЗАО «АСКОН» или непосредственно в управленческие программы высшего типа (уровня) (ERP) «1С: Предприятие» или «Гольфстрим» той же ЗАО «АСКОН».

Одной из таких измерительных систем являются координатно-измерительные машины (КИМ).

Однако перед принятием решения необходимо провести анализ целесообразности использования КИМ по сравнению с другими средствами измерения (СИ).

Рассмотрим данный вопрос подробнее на примере использования КИМ для контроля размеров прямозубых зубчатых колес и обкатного зубообрабатывающего инструмента (долбяки, шеверы, обкатные штанги (рейки)), относящихся к параметрам зацепления, методами функционально-стоимостного анализа (ФСА).

В рамках проведения первого этапа ФСА (Планирование и подготовка), на предприятии АК «Туламашзавод» при отделе главного метролога, была сформирована экспертная группа. Основной задачей ее работы была оптимизация номенклатуры СИ для контроля зубчатых колес с целью повышение (сохранения) качества выполнения работ при сохранении (понижении) прежней стоимости.

В рамках второго (информационного) этапа проводилось обоснование рассматриваемого диапазона степеней точности зубчатых колес 7-9 и диаметром от 50 до 300 мм, т.к. только для них в принципе целесообразно использование КИМ [1, 2].

Было также определено, что, хотя перечень параметров зубчатого колеса очень обширен (ГОСТ ISO 1328-1–2017, ГОСТ 1643–81 и т.п.), однако те из них, которые подлежат непосредственному контролю на производстве не столь велик и определяется ГОСТ 2.403-75 (см. табл. 1):

Таблица 1

Минимальные требования для контроля зубчатых колес

Название параметра	Обозначение
Постоянная хорда зуба	$\overline{s_c}$
Высота до постоянной хорды	$\overline{h_c}$
или	
Длина общей нормали	W
или	
Торцовый размер по роликам (шарикам)	M
в обязательном порядке	
Радиальное биение зубчатого венца	F_r

На чертеже зубчатого колеса с нестандартным исходным контуром должны быть приведены данные для контроля по нормам (для рассматриваемых степеней точности):

- кинематической точности (6 параметров);
- плавности работы (8 параметров);
- контакта зубьев в передаче (2 параметра);
- бокового зазора (2 параметра).

Конкретный перечень параметров в данном случае устанавливает производитель, но не менее предусмотренного ГОСТ.

Также кроме минимальных могут устанавливаться и дополнительные параметры (см. табл. 2).

Таблица 2

Дополнительные требования

Размеры для контроля торцового профиля зуба	
Название параметра	Обозначение
Основной диаметр	d_b
Радиус кривизны активного профиля зуба в нижней точке	r_p
Угол развернутости	ν_p
Радиус кривизны профиля зуба в начальной точке модификации головки	r_g
Нормальная глубина модификации	ν_g
Размеры для контроля взаимного положения одноименных профилей зубьев	
Шаг зацепления	p_a
Осевой шаг	p_x
Ход зуба	p_z

В результате проведенного экспертной группой анализа измеряемых параметров, было принято решение рассматривать два основных направления работы:

1. Технический контроль стандартных изделий, подразумевающий измерение параметров из минимального набора требований (см. табл. 1);
2. Контроль изделий специального назначения, требующий либо измерений параметров колес с нестандартным исходным контуром, либо дополнительных требований в сочетании с минимальными.

Третьим этапом (аналитический) стало определение стоимости и ценности выбранных направлений работы.

Так стоимость минимального набора СИ обеспечивающего контроль параметров указанных в табл. 1 представлена в таблице 3:

Таблица 3

Перечень необходимого оборудования

Название прибора	Контролируемый параметр	Цена, руб.
Микрометр зубомерный, ц/д 0,001 мм	W, M	Около 500 000
Нормалемер, ц/д 0,002 мм	W, M	Около 150 000
Штангензубомер, ц/д 0,01мм	$\overline{s_c}, \overline{h_c}$	Около 50 000
Тангенциальный зубомер, ц/д 0,01мм	$\overline{s_c}, \overline{h_c}$	Около 50 000
Межцентромер ТУ 2-034-515-80	M_r	Около 1 500 000
Биениемер тип Б-10М ТУ 2-034-216-85	F_r	Около 1 000 000

Следует отметить, что штангензубомер и тангенциальный зубомер по точности подходят для контроля выбранного диапазона параметров колес только при диаметре от 150 мм и более. Следовательно, необходимо добавить прибор для их замещения, например, межцентромер (ТУ 2-034-515-80), стоимость которого около 1 500 000 рублей.

Итоговая сумма около 3 250 000 рублей, а если учитывать, рассматриваемый диапазон контролируемых диаметров, то может потребоваться еще как минимум 2 типоразмера микрометров, что увеличивает итоговую сумму до 4 250 000 рублей.

Во втором случае перечень параметров, подлежащих контролю очень велик. В данном случае целесообразно купить специализированный прибор для контроля зубчатых колес или КИМ с соответствующим программным обеспечением, т.к. ни один из приведенных параметров не является комплексным и контролю универсальными средствами не подлежит.

Стоимость специализированного прибора типа GearSpect DO 500 CNC (Чехия) стоимостью от 12 000 000 рублей в зависимости от комплектации.

Средняя стоимость КИМ производства Китая или Индии, включая соответствующее программное обеспечение, составляет около 10 – 12 млн. рублей. Из этой суммы специализированное программное обеспечение для контроля параметров зубчатых колес занимает от 1 до 2 млн. рублей.

В результате проведенного анализа, экспертной группой была установлена целесообразность использования КИМ для контроля параметров зубчатых колес и обкатного зуборезного инструмента, при наличии соответствующего программного обеспечения (ПО).

При отсутствии ПО для контроля зубчатых колес, целесообразно произвести его закупку или провести его разработку в рамках НИР, т.к. стоимость данного ПО как минимум в 2 раза ниже цены необходимого оборудования и как минимум в 6 раз ниже, в случае рассмотрения второго варианта контроля.

Рекомендовано разработать программное обеспечение, позволяющее проводить анализ результатов измерения зубчатых колес и обкатного зуборезного инструмента.

После проведения анализа, в соответствии с рекомендациями была разработана методика и разработана программа [3,4,5], позволяющая использовать КИМ в качестве прибора для контроля зубчатых колес.

В рамках гранта Правительства Тульской области — ДС/175/ИМС/24/ТО «Проектирование специального импорта-замещающего инструмента для финишной обработки цилиндрических зубчатых колес», программа была адаптирована для обработки параметров обкатного зуборезного инструмента.

Список литературы

1. Ушаков М.В. Оценка области использования КИМ / Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М. / Мир измерений. 2022. № 2. С. 49-51;
2. Никольский С.М. Расчет экономической эффективности эксплуатации координатно-измерительной машины / Никольский С.М. / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 601-603;
3. Никольский С.М. Методика обработки измерительной информации при контроле геометрических параметров зубчатых колес на КИМ / Никольский С.М. / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 167-173;
4. Никольский С.М. Алгоритмизация процесса контроля геометрических параметров зубчатого колеса на КИМ / Никольский С.М., Ушаков М.В., Воробьев И.А. / Контроль качества продукции. 2024. № 10. С. 52-57;
5. Грант Правительства Тульской области — ДС/175/ИМС/24/ТО «Проектирование специального импорта-замещающего инструмента для финишной обработки цилиндрических зубчатых колес».

Маликов Андрей Андреевич, д-р техн. наук, профессор, проректор по финансовой деятельности, заведующий кафедрой, finance@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Никольский Сергей Михайлович, аспирант, nikolsky.serge@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

FUNCTIONAL AND COST ANALYSIS OF THE USE OF CMM FOR QUALITY CONTROL
OF GEARS AND GEAR TURNING TOOLS

A.A. Malikov, S.M. Nikolsky

This paper gives an example of the application of functional cost analysis (FCA analysis) in order to justify the use of coordinate measuring machines for quality control of parameters of gears and hobbing tools. The minimum and additional requirements for gear inspection were determined. The cost analysis of manual by degree of automation, highly specialised and universal measuring instruments necessary for quality control of gear wheels manufacturing is carried out.

Key words: FSA-analysis, quality, gear wheel, turning gear cutting tool.

Malikov Andrey Andreevich, doctor of technical sciences, professor, vice-rector for financial affairs, head of the department, finance@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nikolsky Sergey Mikhailovich, postgraduate, nikolsky.serge@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 005.6

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-263-264

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ КАЧЕСТВА И МОДЕЛЬ КАНО

С.Н. Ларин, М.Г. Нуждин, А.С. Даниелян, Е.И. Хунузиди, Г.А. Нуждин

Обсуждены вопросы сравнительного анализа классической и новой моделей Кано. Рассмотрены ключевые категории характеристик качества, такие как обязательные, одномерные и привлекательные, а также их влияние на степень удовлетворенности потребителей. Обращено внимание значимости синергии методологии Кано, СФК и требований национальных стандартов РФ для успеха разработки продукции в условиях высокой конкуренции и динамично изменяющегося рынка.

Ключевые слова: структурирование функции качества, модель Кано, Новая модель Кано, машиночитываемая маркировка для металлопродукции, удовлетворенность потребителей.

Анализ и систематизация опыта организаций машиностроения в рамках обеспечения качества продукции взаимосвязаны с применением современных методов и средств для решения различных задач жизненного цикла изделия, с применением информационных технологий для моделирования и организации информационного взаимодействия участников жизненного цикла изделия в различных процессах [1].

В этих условиях, сопровождаемых стремительным технологическим прогрессом, приоритетом электронного (цифрового) представления информации и высокой конкуренцией на рынке, перед предприятиями стоит необходимость всестороннего понимания потребностей потребителей. Выполнение требований по базовым потребностям не полностью гарантирует

конкурентных преимуществ. Для успеха продукция и услуги должны не только соответствовать требованиям и ожиданиям, но и превосходить их, формируя у потребителей удовлетворенность, положительные отзывы, благодарность и лояльность [2-3].

Системный и комплексный подход в этом вопросе может быть усилен методами и инструментами, обеспечивающими изучение потребительских предпочтений. К примеру, применение метода Структурирования функции качества (СФК, QFD) и методологии Кано может предоставить предприятиям возможность глубинного изучения требований и ожиданий потребителей, скрытых потребностей, сценарных предпочтений и эмоциональных аспектов [4-7].

Метод СФК, по существу, есть перевод потребностей потребителя, его ожиданий и требований на язык технического задания на разработку продукции и соответствующего технологического процесса, включая, например, его моделирование [8]. Процедура метода включает выявление и расстановку приоритетов с помощью архитектуры ожиданий и требований потребителей [4]. Данные процессы значительно усиливаются интеграцией методологии Кано – модели для классификации характеристик продукции на основании их ценности для целевой аудитории. Классификация запросов потребителей в категории качества по Модели Кано позволяет повысить эффективность СФК, направляя ресурсы на разработку наиболее значимых для конечных потребителей характеристик продукции [7]. Наряду с оригинальной Моделью Кано, разработанной доктором Нориаки Кано и др. [9], существует расширенная модель – Новая модель Кано, предложенная директором Института QFD Гарольдом Россом [10].

Цель статьи – сравнить классическую и новую модели Кано, проанализировав их в контексте применения в СФК для глубокого понимания потребностей потребителей и создания востребованной продукции.

Структурирование функции качества (QFD, Quality Function Deployment) – комплексный метод, направленный на преобразование «голоса потребителя» в определенные технические характеристики продукции. В этом преобразовании основные показатели, которые влияют на качество, целесообразно изображать в виде облака качества [11]. Ключевым элементом метода выступает «Дом качества» – набор таблиц и матричных диаграмм, устанавливающий взаимосвязь между потребительскими требованиями (ПТ) и инженерными характеристиками (ИХ) (рис. 1). При этом в случае, если организация находится на начальном этапе разработки и внедрения системы менеджмента качества (СМК), либо в начале интеграции СМК с другой (другими) системой менеджмента, то в целях выявления ожиданий потребителя построение Дома качества является весьма показательным [11].

Основные этапы процесса СФК включают: первичный сбор ПТ («голоса потребителя»), их обработка и приоритизация, перевод голоса потребителя на язык инженерных характеристик, оценка корреляции и важности ИХ, бенчмаркинг, принятие решений на основе данных [11, 12].

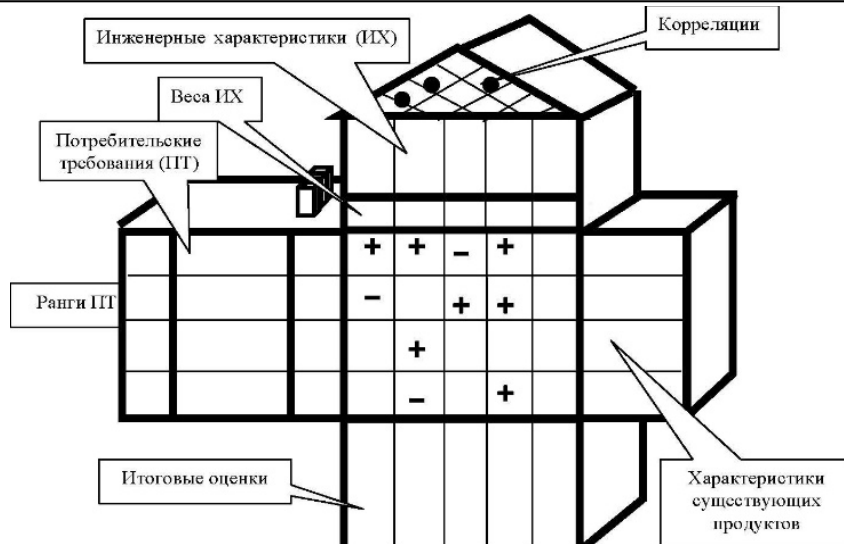


Рис. 1. Дом качества

Метод СФК зарекомендовал себя как эффективный подход к обеспечению соответствия продукции ожиданиям потребителей на ранних стадиях жизненного цикла продукции, сокращающий разрыв между запросами рынка и функциональными свойствами продукции. Построение дома качества дает организации информацию об уровне своей конкурентоспособности, позволяющей сконцентрировать усилия персонала на слабых сторонах, работа над которыми позволит существенно повысить конкурентоспособность [11, 12, 13].

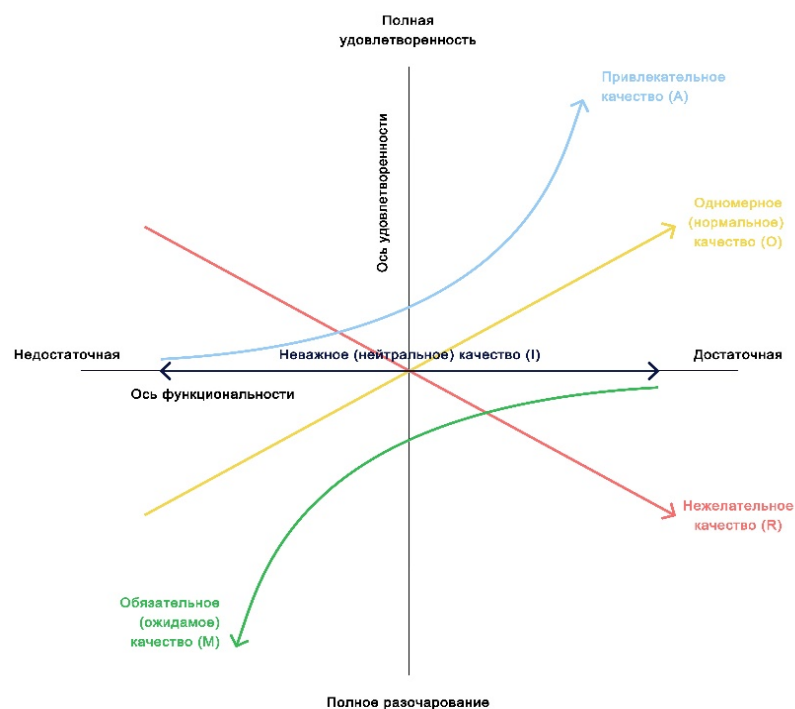


Рис. 2. Удовлетворенность потребителей и категории качества по Модели Кано [9, 10]

Интеграция Модели Кано в метод СФК значительно расширяет возможности для анализа и приоритизации ПТ. Модель Кано предоставляет экспертам инструмент для классификации характеристик продукции по ключевым категориям, отражающим их влияние на удовлетворенность потребителей – обязательные, одномерные, привлекательные, неважные и нежелательные (рис. 2) [9, 10]. Например, обязательные характеристики продукции играют критичную роль в удовлетворении базовых требований потребителей, тогда как включение привлекательных аспектов способно значительно повысить степень удовлетворенности продукцией [14].

Методология Кано базируется на идее, что потребительские характеристики продукции можно разделить на пять категорий качества, в зависимости от того, как то или иное качество влияет на удовлетворенность потребителя и восприятие им ценности продукции. В таблице 1 представлены категории качества с описаниями и примерами для функции машиносчитываемой маркировки для металлопродукции по ГОСТ Р 70742 и ГОСТ 7566.

Таблица 1

Категории качества по Модели Кано

Характеристики качества	Описание	Пример
Обязательные (Must-be Quality, M)	Базовые характеристики продукции, отсутствие которых вызывает неудовлетворенность, а наличие не добавляет ценности для потребителя.	Четкость и несмысловая маркировки. Исключение ошибок при вводе данных
Одномерные (One-Dimensional Quality, O)	Характеристики, прямо пропорционально влияющие на степень удовлетворенности потребителей: чем лучше их выполнение, тем выше удовлетворенность.	Автоматизация считывания маркировки
Привлекательные (Attractive Quality, A)	Характеристики, наличие которых способно вызвать восторг потребителей, но их отсутствие не влияет на удовлетворенность.	Метод лазерной гравировки для нанесения машиносчитываемой маркировки
Неважные (Indifferent Quality, I)	Характеристики, не влияющие на восприятие качества.	дополнительная цветовая маркировка краской (по согласованию изготовителя с заказчиком)
Нежелательные (Reverse Quality, R)	Характеристики, наличие которых может вызвать негативный отклик у потребителей.	Ошибка выбора языка при маркировке металлопродукции, поставляемой на внешний рынок

Таблица 2

Вопросы и варианты ответов по классической Модели Кано

Вопросы	Варианты ответов
«Как Вы отнесетесь к тому, что характеристика (название) будет присутствовать?»	- Мне бы понравилось - Ожидая этого - Мне все равно
«Как Вы отнесетесь к тому, что характеристика (название) будет отсутствовать?»	- Мне бы не понравилось, но мог бы перетерпеть - Мне бы не понравилось, и я бы не пользовался продукцией из-за этого

Опрос по классической Модели Кано включает два типа вопросов: функциональные (на наличие характеристики) и дисфункциональные (на отсутствие характеристики) [9]. С помощью этой пары вопросов выявляется восприятие каждой характеристики потребителем. Для ответов предлагаются пять вариантов, на основании которых характеристики классифицируются в одну из категорий (рис. 3). В таблице 2 приведены вопросы и варианты ответов.

Для анализа полученных результатов, после классификации характеристик по категориям по каждому респонденту, подсчитывается общее количество случаев соотнесения каждой характеристики к той или иной категории. В случаях, если характеристика одинаково часто относится к нескольким категориям, характеристика помещается в категорию выше по следующему приоритетному порядку: обязательные, одномерные; привлекающие; неважные.

		Ответ на дисфункциональный вопрос (на отсутствие характеристики)				
		Нравится	Ожидая	Все равно	Потерплю	Не нравится
Ответ на функциональный вопрос (на наличие характеристики)	Нравится		A	A	A	O
	Ожидая	R		I	I	M
	Все равно	R	I	I	I	M
	Потерплю	R	I	I		M
	Не нравится	R	R	R	R	

**Рис. 3. Матрица для определения категории характеристики
(пустые ячейки соответствуют сомнительным ответам:
при большом количестве таких ответов следует искать ошибки
в опросе)**

Оригинальная модель Кано эффективно выделяет значимые для потребителей аспекты качества продукции [15, 16, 17], однако имеет ограничения: недостаточно учитывает эмоциональные аспекты и скрытые потребности, а также упускает сценарные предпочтения потребителей. Для решения вышеупомянутых проблем Гарольд Росс предложил расширить анализ, добавив соответствующие вопросы, и назвал это «Новой моделью Кано» [6, 10]. В Новой модели Кано дополнительные вопросы служат ключом к глубокому пониманию, как именно характеристики продукции влияют на удовлетворенность и восприятие потребителей:

- Учет эмоционального аспекта: Новая модель Кано акцентирует внимание на эмоциях, вызванных характеристикой. Вместо простой оценки полезности характеристики изучаются испытываемые потребителем ощущения.

Пример вопроса: «Как Вы будете себя чувствовать, если требуемый шаг размещения маркировки при нанесении на поверхность объекта будет автоматически адаптирован к Вашим требованиям при разделке металлопродукции?».

- Анализ сценарных предпочтений: Вместо двух стандартных вопросов на наличие и отсутствие характеристики, новая модель помогает анализировать чувства потребителей относительно характеристики в разных контекстах.

Пример вопроса: «Вы бы предпочли эту характеристику, если бы она иногда ограничивала производительность устройства?».

- Выявление скрытых потребностей: Новая модель направлена на понимание, какие характеристики могут стать желанными для потребителя в будущем, даже если он пока их не осознает.

Пример вопроса: «Вы бы нашли полезным, если бы при маркировке будут предложены рекомендации по количеству, месту и способам крепления ярлыков с размещенными символами штрихового кода, навешиваемых на металлопродукцию?».

- Сегментация по предпочтениям: Новая модель позволяет проанализировать, как различные группы потребителей воспринимают одну и ту же характеристику. Это актуально для продукции, ориентированной на широкую аудиторию с различными потребностями.

Пример вопроса: «Какой уровень контроля над характеристикой Вы бы предпочли: автоматический или комбинированный?».

В таблице 3 представлены результаты сравнительного анализа классической и новой моделей Кано. Анализ проводился по следующим критериям: скорость и глубина анализа; эффективность в зависимости от зрелости продукции и рассматриваемого рынка.

Таблица 3

Сравнение версий модели Кано

Модель	Преимущества	Ограничения
Классическая модель Кано	- Простота и скорость применения - Структурированный процесс сбора и анализа данных - Требуется меньше ресурсов - Хорошо подходит для первичной оценки характеристик	- Низкий уровень персонализации - Недостаточный учет скрытых потребностей - Игнорирование эмоциональных и ситуативных факторов
Новая модель Кано	- Глубокий анализ потребительских предпочтений - Высокий уровень персонализации - Адаптивность к высококонкурентным и быстро меняющимся рынкам	- Сложность интерпретации данных - Требуется больше ресурсов (в т. ч. времени) - Может оказаться избыточной для продукции с низкой вариативностью

На основании результатов сравнительного анализа можно сделать следующие выводы:

- для зрелой продукции и рынков с низкой конкуренцией эффективнее использовать классическую Модель Кано, поскольку она обеспечивает быстрый анализ основных характеристик;

- классическая модель Кано также хорошо подходит для применения в создании минимально жизнеспособного продукта, поскольку дает возможность сфокусироваться на ключевых потребностях потребителей и создать фундамент для дальнейшего совершенствования продукции;

- для инновационной продукции и на динамичных рынках с высокой конкуренцией предпочтение следует отдать Новой модели Кано;

- в условиях ограниченных ресурсов целесообразно начать с применения классической модели и постепенно переходить к Новой модели Кано, по мере расширения аналитических возможностей компании.

Включение результатов анализа по Модели Кано в процесс СФК (процесс «построения Дома качества») обеспечивает обоснованное распределение ресурсов в процессе проектирования продукции, а также создает основу для разработки конкурентоспособной продукции, соответствующей как явным (высказанным и подразумеваемым), так и скрытым (неосознанным) потребностям потребителей [11, 15, 18, 19].

В современных условиях динамичного развития рынка и усиливающейся конкуренции комплексный и адаптивный подход к анализу потребностей и предпочтений потребителей приобретает стратегическое значение. Интеграция Новой модели Кано в метод СФК способствует углублению исследования голоса потребителей, в связи с учетом ситуативных и эмоциональных факторов. Вместе с этим модель Кано демонстрирует особую ценность в контексте сегментации рынка, предоставляя возможность адаптации характеристик продукции к потребностям целевых групп.

Перспективы применения методологии Кано в СФК во многом определяются ее гибкостью для адаптации к различным рыночным условиям и типам продукции. Для стабильных рынков с низким уровнем конкуренции классическая модель обеспечивает скорость приоритизации потребностей потребителей и снижение затрат на проектирование. В условиях высокой конкуренции большие перспективы получает Новая модель Кано, предоставляя инструменты для разработки инновационных решений и адаптации продукции под динамичные потребности потребителей. Таким образом, интеграция как классической, так и новой Модели Кано в СФК расширяет его возможности как универсального метода, способного эффективно реагировать на вызовы современной экономики.

Таким образом, проведенным анализом совместного применения метода СФК и моделей Кано на примере машиночитываемой маркировки для металлопродукции по ГОСТ Р 70742 и ГОСТ 7566 продемонстрирована положительная значимость интеграции различных подходов для глубокого понимания потребностей потребителей и создания востребованной продукции. Интеграция цифровых технологий в процессы сбора и анализа потребительских предпочтений может способствовать объединению сильных сторон СФК, модели Кано и современных требований национальных стандартов РФ.

Список литературы

1. ГОСТ Р 2.001—2023. Единая система конструкторской документации. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 6 с.
2. ГОСТ Р ИСО 9001—2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.
3. Хунузиди Е.И., Нуждин Г.А. Управление качеством на инструментальном предприятии. // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2016. №11. С. 40–44.

4. ISO 16355-1:2021. Application of statistical and related methods to new technology and product development process – Part 1: General principles and perspectives of Quality Function Deployment (QFD). – Switzerland: ISO, 2021.
5. Aulia I., Rosnani G., Bayu S., Alfin Fauzi M. Integration of Kano Model and Quality Function Deployment (QFD) to Improve Product Quality: A Literature Review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1003.
6. Ross H. New Kano Model – How to Really Excite Your Customers // Transactions of the 26th Symposium on QFD. 2014.
7. Matzler K., Hinterhuber H. H. How to make product development projects more successful by integrating Kano's model of customer satisfaction into quality function deployment // Technovation. 1998. Vol. 18, No. 1. P. 25–38.
8. Ларин С.Н., Платонов В.И., Нуждин Г.А. Модель изотермического стесненного деформирования материала, подчиняющегося кинетической теории ползучести и повреждаемости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 4. С. 9-17.
9. Kano N., Seraku N., Takahashi F., Tsuji S. Attractive Quality and Must-Be Quality // Journal of the Japanese Society for Quality Control. 1984. Vol. 14, No 2. P. 39-48.
10. New Kano Model // QFD Institute. [Электронный ресурс] URL: <https://www.qfdi.org/new-kano-model> (дата обращения: 10.12.2024).
11. Хунузиди Е.И. и др. Управление качеством услуг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 9. С. 365 –377.
12. Адлер Ю.П. Качество и рынок, или как организация настраивается на обеспечение требований потребителей // Поставщик и потребитель. М.: РИА «Стандарты и качество», 2000. С. 35–81.
13. Брагин Ю.В., Корольков В.Ф. Путь QFD: Проектирование и производство продукции исходя из ожиданий потребителей. Ярославль: Центр качества, 2003. 240 с.
14. Асанов Г.Н., Ляпина Г.И., Нуждин Г.А., Самошкин Ю.А. Мониторинг удовлетворенности потребителей // Контроль. Диагностика. 2007. №5. С. 71–73.
15. Анисимова М.А., и др. Мониторинг образовательной деятельности методом структурирования функции качества // Контроль. Диагностика. 2010. №6. С. 46 – 49.
16. Меркурьева Г.Ю., и др. Применение метода Н. Кано для оценки удовлетворенности студентов образовательным процессом по фармацевтической технологии // Казанский ГМУ. 2023.
17. Николаева Н.Г., Исмаилова Р.Н. Модель Н. Кано: выбор направлений развития испытательной лаборатории // Компетентность. 2021. № 1.
18. Tontini G. Integrating the Kano Model and QFD for Designing New Products // Total Quality Management & Business Excellence. 2007. Vol. 18, No. 6. P. 599-612.

19. Гурина М.А., Румянцева Ю.В. Комплексные инструменты и методологии повышения качества в управлении конкурентоспособностью торгового предприятия // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81, № 2. С. 320-335.

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, директор ПТИ, заведующий кафедрой, larin_1@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нуждин Михаил Георгиевич, магистрант, mishanuzhdin1@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Даниелян Арусяк Саргисовна, аспирант, danielyan.arusyak@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС — российский технический университет,

Хунузиди Елена Ивановна, канд. техн. наук, доцент, el_hun@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС — российский технический университет,

Нуждин Георгий Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального директора, nuzhdin.65@mail.ru, Россия, Москва, ООО НПФ «Техполиком»

STRUCTURING THE QUALITY FUNCTION AND THE KANO MODEL

S.N. Larin, M.G. Nuzhdin, A.S. Danielyan, E.I. Khunuzidi, G.A. Nuzhdin

The issues of comparative analysis of classical and new Kano models are discussed. The key categories of quality characteristics, such as mandatory, uniform, and attractive, as well as their impact on consumer satisfaction, are considered. Attention is drawn to the importance of the synergy of the Kano methodology, SFK and the requirements of the national standards of the Russian Federation for the success of product development in a highly competitive and dynamically changing market.

Key words: structuring the quality function, Kano model, new Kano model, machine-readable labeling for metal products, consumer satisfaction.

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, deputy director of polytechnical institute, head of chair, larin_1@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nuzhdin Mikhail Georgievich, master, mishanuzhdin1@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Danielyan Arusyak Sargisovna, postgraduate, danielyan.arusyak@mail.ru, Russia, Moscow, National Research Technological University MISIS — Russian Technical University,

Khunuzidi Elena Ivanovna, candidate of technical sciences, docent, el_hun@mail.ru, Russia, Moscow, National Research Technological University MISIS — Russian Technical University,

Nuzhdin Georgy Anatolyevich, candidate of technical sciences, docent, deputy general director, nuzhdin.65@mail.ru, Russia, Moscow, Techpolicom Scientific and production company

УДК 004.413

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-272-273

МЕТОДИКА МССР (MODELING, CALIBRATION, CHALLENGE, PRODUCTION) В СРАВНИТЕЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ПУНКТОВ ГАРАНТИЙНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

В.Г. Мосин, В.Н. Козловский, А.С. Клентак, О.В. Пантюхин

В статье рассматривается авторская методика детекции аномальных состояний, основанная на методах машинного обучения и анализа больших данных. Излагаются основные этапы методики в приложении к данным о гарантийном обслуживании автомобилей в сервисных центрах одного из ведущих отечественных автопроизводителей и приводятся примеры возможного эффекта от её внедрения.

Ключевые слова: управление качеством, автомобилестроение, гарантийное обслуживание, анализ данных, временные ряды, машинное обучение, регрессия, *pandas*, *pumpru*, *sklearn*.

1. Введение. Продукт как комплексное явление в автомобильной промышленности представляет собой не только собственно автомобиль как материальный объект, но и систему сервисного обслуживания, то есть сеть сервисов, распределенных по территории и функционирующих в максимально удобном для пользователя режиме, и это уже не изделие, а услуга. Поэтому для управления качеством продукта (в широком, комплексном смысле этого слова) в автомобилестроении важно уметь не только контролировать и по возможности улучшать технические и эксплуатационные характеристики изделий, но и отслеживать эффективную работу сервисов, сопровождающих изделия на этапе постпродажного обслуживания.

В настоящей работе мы представим авторскую методику МССР, которая позволяет в режиме реального времени передавать в управляющий контур сообщения о зафиксированных аномальных состояниях того или иного сервисного центра (пункта гарантийного обслуживания), то есть методику мониторинга, разберём её основные этапы и опишем возможный эффект от её применения. Мы уже разбирали концептуальные положения этой методики [1, 5, 6], отмечая особенности нестационарных процессов, здесь же мы используем рассмотренные ранее принципы и реализуем их в виде конкретных методологических этапов.

С технической точки зрения методика МССР основана на построении прогнозирующих моделей методами машинного обучения и анализа больших данных, для работы с которыми мы используем среду Jupyter Notebook, предоставляющую удобные инструменты для работы с языком программирования Python и его основными библиотеками: *pumpru*, *pandas*, *sklearn* и *matplotlib* [1, 4, 7].

2. Описание данных. Данные, предоставленные одним из ведущих отечественных автопроизводителей, содержат сведения о наблюдениях за обращениями в пункты гарантийного обслуживания по поводу некоторой

(известной владельцу процесса, но не известной аналитику) группы дефектов (код группы — A21EF, но нам это ни о чем не говорит) [8, 9]. Наблюдения проводились в течение 100 недель в 59 локациях, данные записаны в виде таблицы 59 на 100; измеряемый показатель — процент обращений с дефектами данной группы от всех обращений.

	2022-10-01	2022-10-08	2022-10-15	...	2024-08-24
197240-XV	1.6	1.5	1.7	...	1.9
226293-ZV	1.8	1.4	1.2	...	2.0
228653-YW	1.9	1.4	1.8	...	2.1
...	...	...	...	...	...
992100-YW	1.4	1.3	1.4	...	1.6

Строки таблицы маркированы кодами локаций (где в качестве локаций выступает какой-то конкретный пункт гарантийного обслуживания), столбцы — датой окончания недели, в течение которой агрегировались данные.

3. Методика МССР. Методика МССР (Modeling, Calibration, Challenge, Production) подразумевает поэтапное проведение процедуры детекции аномалий и изначально была разработана для временных рядов [10, 11]. Однако она оказалась настолько удачной, что её можно применять не только к процессам, изменяющимся во времени, но и к стационарным относительно времени множествам. В это разделе мы опишем особенности её применения к набору локаций (то есть, к множеству, а не к процессу), а в следующих — изложим её этапы более подробно.

3.1. Modeling. Мы хотим в каждый момент времени определять, нормально ли значение измеряемого показателя в локации, ориентируясь на его значения в этот же момент в других локациях [12, 13].

Начнём с «начала времён»: с первой имеющейся у нас даты наблюдений, 2022-10-01, и пусть нас интересует вопрос: «Значение 1.4, зафиксированное в локации 992100-YW — это нормально? Или это аномальное значение?» Ответ напрашивается сам собой. Нам нужно сравнить 1.4 со значениями, зафиксированными в других локациях, и если они примерно такие же, то все нормально, а если сильно отличаются, то у нас возникают основания полагать, что в локации 992100-YW наблюдается какая-то аномалия. И точно так же со всеми другими локациями: 228653-YW, 197240-XV и т. д.

Теперь допустим, что прошла неделя, наступил момент времени 2022-10-08, и нас снова интересует тот же вопрос: «Нормально ли следующее значение 1.3, которое зафиксировано в новый момент 2022-10-08 в локации 992100-YW, или это аномалия?». Конечно, можно поступить так же, как и раньше, но, во-первых, это скучно, а во вторых — неправильно.

В «начале времён» мы сравнивали показатель со средним по другим локациям просто потому, что мы ничего не знали о них (о локациях), и единственное, что мы могли с ними сделать — это посчитать среднее. Отклонение от среднего и было нашим индикатором нормы или аномалии. Но дело в том, что все локации разные: то, что нормально в одной из них, вполне

может оказаться вопиющей аномалией в другой, и наоборот. Мы хотели бы учитывать особенности локаций при принятии решений об аномальности.

Давайте подумаем, что мы знаем теперь о локациях. Казалось бы, как и раньше: ничего кроме кода. Ни город, в котором находится локация (а, может быть, это не город, а посёлок?), ни её адрес в пределах города (или посёлка) нам по-прежнему неизвестны. Мы не знаем, сколько сотрудников в штате локации, давно ли она функционирует и т. д. — мы по-прежнему ничего не знаем [14, 15]. Но если подумать, то всё-таки знаем: теперь нам известно значение целевого показателя, которое было зафиксировано там в предыдущий момент.

Локации перестали быть одинаковыми: где-то было зафиксировано большое значение, где-то маленькое, а где-то (точнее говоря, в большинстве случаев) — типичное.

Пусть прошла ещё одна неделя, наступил момент 2022-10-15. Рассуждая в той же логике, обнаруживаем, что теперь мы знаем о локациях в два раза больше: для каждой из них нам известны два значения, зафиксированные в предыдущие моменты времени [16, 17]. А в последний из доступных нам для анализа моментов, 2024-08-24, мы вообще имеем длинную цепочку наблюдений за каждой из локаций, состоящую из 99 позиций — очень подробное описание [18].

Мы называем эту цепочку значений — портрет локации. Его можно визуализировать (см. рис. 1), окажется, что портрет локации — это кривая, что портреты разных локаций похожи друг на друга, но нет двух одинаковых портретов.

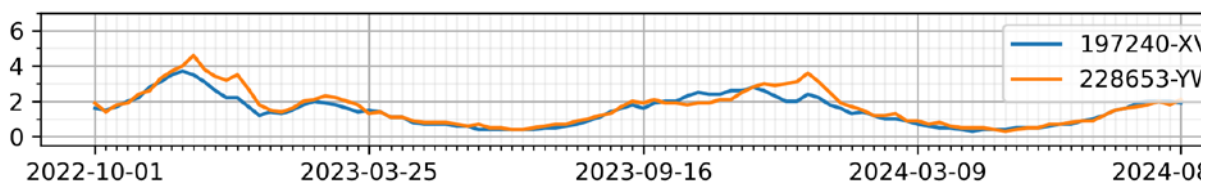


Рис. 1. Портреты двух локаций

Портрет локации детализируется с течением времени (возможно, эта детализация в какой-то момент становится даже излишней). В нулевой момент времени портрет отсутствует, это пустое множество; в первый момент он состоит из одной точки; во второй — это отрезок прямой, соединяющий два наблюдения; а в последний момент (из всех доступных для наблюдения моментов времени) — это протяжённая кривая, подробно описывающая локацию при помощи полной истории её наблюдений [19, 20].

Однако, мы придумали портреты локаций не для того, чтобы использовать в своей речи поэтические метафоры, а из сугубо прагматичных соображений. Теперь мы можем сравнивать локации по степени близости (не в географическом смысле, а в контексте изучаемого процесса): две локации являются близкими друг к другу, если у них похожие портреты, а выражаясь более конкретно, если расстояние между двумя кривыми мало; соответственно, они являются далёкими друг от друга, если их портреты непохожи,

то есть, если расстояние велико. А посчитать расстояние между кривыми — это задача для студента первого курса, это мы умеем.

Близким локациям должны отвечать близкие значения измеряемого показателя — такова базовая предпосылка любого метода прогнозирования, и наш метод не является исключением. После того, как мы придумали трюк с портретами, у нас возникает возможность предсказывать значение характеристики в одной отдельно взятой локации, отталкиваясь от её значений в других локациях (она будет примерно такой, как в локациях с похожими портретами), и это именно то, к чему мы стремились.

Если в нулевой момент времени 2022-10-01 мы ничего не знали о локациях (мы всё-таки не можем удержаться от поэтической портретной метафоры: сначала все локации были для нас на одно лицо), и, прогнозируя значение характеристики в одной из них, мы просто брали в качестве прогноза среднее значение характеристики в других локациях, то уже в первый момент 2022-10-08 мы можем построить регрессионную модель с одним предиктором (используя в качестве предиктора предыдущий столбец таблицы данных), во второй момент — модель с двумя предикторами (используя два предыдущих столбца) и т. д.

Так возникают нетривиальные модели в любой момент времени, кроме нулевого, когда мы вынуждены использовать отклонения от среднего. Но, кстати говоря, среднее значение — это тоже модель, только слишком уж она примитивна: она константна и, следовательно, не интересна в силу своей низкой информативности.

3.2. Calibration. Идея метода МССР состоит в том, что если значение характеристики, спрогнозированное в некоторой локации по её значениям в других локациях, сильно отличается от её реального значения, то в этой локации наблюдается аномалия. Ключевое слово — сильно. Модельные значения никогда не совпадают с реальными, но для какой именно величины отклонения мы говорим, что это отклонение сильное? Чтобы ответить на этот вопрос, нужна калибровка, под которой мы понимаем анализ отклонений модели от реальности, и декларацию порога толерантности: все, что выше этого порога мы будем считать аномалией.

К счастью для нас, речь идёт о случайной величине, относящейся к типу ошибок измерений, которые всегда подчинены нормальному закону с нулевым средним. Поэтому в качестве критерия для определения порога толерантности мы применяем модифицированное правило трёх сигм, а если выразиться точнее, то правило не трёх, а нескольких k сигм, оставляя за собой право изменять коэффициент k в зависимости от обстоятельств (это право понадобится нам позже, на этапе челленджа). Дело за малым: посчитать сигму.

На первый взгляд, имея 59 локаций, мы можем получить 59 отклонений для формирования распределения и вычисления сигмы, но это не так. Мы можем получить практически неограниченное число отклонений, что даст гораздо более подробное распределение и гораздо более правдоподобное значение сигмы. Давайте применим хорошо известный приём

разделения наблюдений на обучающую и тестовую выборки, причём, применим его много раз подряд (см. рис. 2, где мы разбивали локации в пропорции 8 к 2). На синих точках будем учить модель, на жёлтых — делать прогноз, вычислять отклонения прогноза от реальности и накапливать их в общем множестве всех отклонений.

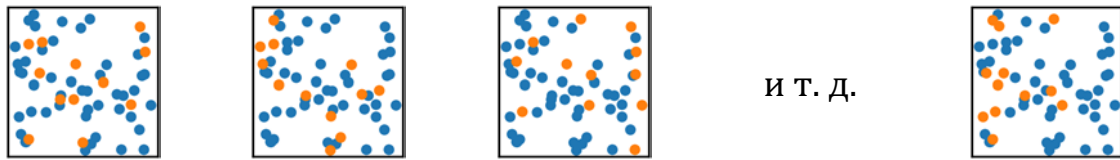


Рис. 2. Разбиения локаций в пропорции 8 к 2: синие точки обучающие, жёлтые — тестовые

Поскольку мы каждый раз назначаем на тест 20% от общего числа локаций (а это 12 шт), то при каждом запуске мы будем получать 12 отклонений, то есть, на 10 запусках это будет 120 отклонений и т. д. Число различных выборок — это число сочетаний из 59 по 12; интересующиеся могут посчитать его по известной комбинаторной формуле, мы же просто скажем: поверьте, это очень много, именно поэтому число доступных нам для анализа отклонений практически неограниченно, что мы и отмечали выше.



Рис. 3. Гистограммы распределения ошибок: слева на 20 запусках, справа на 800 запусках

Действуя таким образом, мы получим большое количество отклонений, распределенных тем более нормально, чем больше их у нас будет (см. рис. 3), после чего легко найдём сигму при помощи стандартной процедуры Python.

А дальше — все в наших руках. Если мы захотим, мы можем выставить классические три сигмы (см. рис. 4(a)), тогда процент локаций, помеченных как аномальные, будет совсем небольшим (примерно 2%-3%). Мы можем увеличить допустимое отклонение, например, до пяти сигм — аномалии станут встречаться крайне редко, а, может быть, с точки зрения нашего алгоритма их вообще не окажется ни в одной из локаций, ни разу за всю историю наблюдений. Или наоборот, выставляя не три сигмы, а две сигмы или даже одну сигму (см. рис. 4(b и c)), мы добьёмся того, что аномальными будут признаны очень многие локации, что тоже не есть хорошо, потому что аномалий не может быть слишком много по определению: если их много, то это уже не аномалии, а вторая разновидность нормы.

В этот момент мы осознаём, что вернулись ровно к тому, с чего начинали: нам по-прежнему неизвестна величина порогового отклонения. Только раньше мы не выражались так научнообразно, не апеллировали к распределениям случайных величин и не хвастались тем, что знаем правило трёх сигм.

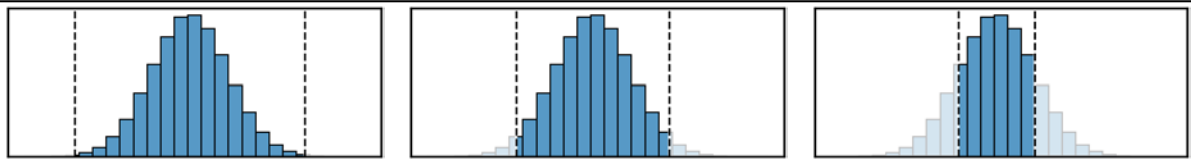


Рис. 4. Доли аномальных локаций, детектированных по правилу k сигм для $k=3, 2$ и 1 соответственно

3.3. Challenge. Действительно, мы так и не узнали ответа на свой вопрос: какое отклонение модели от реальности считать сильным, и признавать соответствующую локацию аномальной, а какое — недостаточно сильным, и оставлять за локацией право быть нормальной. Мы можем выставить в качестве порога толерантности три сигмы (и получить какой-то результат), или одну сигму, или две, или две с половиной сигмы (и получить какие-то другие результаты), но мы так и не узнали, каков же этот порог на самом деле.

Пока всё, что мы предъявляем — не более чем гипотеза: гипотетически такие-то локации в такой-то момент времени демонстрируют аномальные значения наблюдаемой характеристики. Чтобы подтвердить (или опровергнуть) нашу гипотезу, нужно сравнить её с истинным распределением аномалий. Но откуда берётся истинное распределение, и почему наше знание об аномалиях гипотетично (и поэтому нуждается в доказательстве), а какое-то другое, внешнее знание — истинно? Не углубляясь в философский дискурс о природе истины, ответим просто: истинное знание принадлежит экспертному сообществу, а нам нужно сравнить своё представление об аномалиях с представлениями экспертов, и в случае удачи наша гипотеза перестанет быть гипотезой, став доказанным утверждением.

Если же сравнение окажется не в нашу пользу, мы сможем воспользоваться вариабельностью порога, которую мы заложили в наш алгоритм в п. 3.2, и попробовать смягчить, или, наоборот, ужесточить требования детектора (см. рис. 4). Возможно, после этого возникнет согласованность алгоритмического и экспертного подходов. Но не факт. Может оказаться, что причина несогласованности кроется не в калибровке, исправить которую очень легко, а в неудачной модели, исправить которую гораздо сложнее (фактически, придётся писать новую модель). А может оказаться, что дело даже и не в модели, а в том, что мы использовали неверные характеристики и т. д.

В любом случае, детекция аномалий — это итерационный процесс, и нам придётся возвращаться к моделированию и калибровке до тех пор, пока челлендж не будет пройден.

3.3.1. Экспертная группа. Вообще-то экспертная группа — это не проблема аналитиков, это проблема владельца процесса, но так или иначе, для проведения челленджа нам нужно несколько экспертов, причём, их должно быть нечётное число. Нам нужно несколько экспертов, чтобы учесть разные мнения и, соответственно, разные подходы к детекции аномалий, а почему их число должно быть нечётным, станет понятно чуть позже.

3.3.2. Экспертиза. Наш процесс характеризуется при помощи дат, которых 100, и локаций, которых 59 (см. п. 2), то есть, имеется 5900 пар дата-локация, каждая из которых может быть либо нормальной, либо аномальной. В идеале мы хотели бы, чтобы наши эксперты дали свои оценки всем имеющимся у нас наблюдениям, но, будучи реалистами (эксперты сильно заняты, и их услуги стоят дорого, сама экспертиза может занять много времени и т. д.), мы отбираем для челленджа лишь некоторую часть данных, пример, последние 10 дат, и каждый эксперт даёт им свою оценку. Вполне возможно (и даже скорее всего), при вынесения решения о норме или аномалии эксперт будет ориентироваться не на наш дата-сет, который мы представили в п. 2, а на какие-то свои сведения, известные ему, но неизвестные нам. Это его право. В конце концов, это он эксперт, а не мы, стало быть, ему и решать, а как именно он решает — не наше дело. Так или иначе, в итоге возникает экспертная разметка данных, и таких разметок получается столько, сколько мы пригласили экспертов (заметим, что разметки могут отличаться друг от друга и, скорее всего — отличаются, потому что все люди разные, и мнения у них тоже разные).

3.3.3. Истинные знания об аномалиях и норме. Окончательную разметку получаем путём голосования экспертов. В большинстве случаев их мнение совпадёт, и голосование будет единогласным, но иногда то, что один из экспертов посчитает нормой, другой сочтёт аномалией, и тогда окончательное решение будет принято большинством голосов. Именно поэтому нам понадобилось нечётное число экспертов: так мы исключаем редкую, но всё-таки возможную ситуацию, когда голоса поделятся поровну. То, что получается в результате голосования экспертов, и есть истинное знание об аномалиях и норме. Оно несовершенно, но, в любом случае, оно ближе к истине, чем любое другое знание.

3.3.4. Алгоритмические знания об аномалиях и норме. Алгоритмические знания у нас уже есть после этапа калибровки (см. п. 3.2). Точнее, у нас есть набор гипотез, зависящих от порога толерантности (если порог такой-то, то аномалии такие-то), а сам порог мы будем подбирать, ориентируясь на экспертное мнение.

3.3.5. Оценка разметок. Детектор, получая на вход данные о процессе, возвращает разметку по принципу аномалия/норма, то есть, по сути, выполняет работу бинарного классификатора. То же самое делают и эксперты. Поэтому для оценки разметок мы можем применить хорошо известные метрики классификации:

1. accuracy — доля верно распознанных классов;
2. precision — доля истинных аномалий среди всех наблюдений, распознанных детектором как аномалии (другими словами, если среди детектированных аномалий слишком много нормальных состояний, то метрика precision низка);
3. recall — доля распознанных аномалий среди всех истинных аномалий (если мы распознаем лишь незначительную часть аномалий, то метрика recall низка).

Метрика ассурасу практически неприменима к несбалансированным классам, а поскольку классы нормальных наблюдений и аномалий сильно несбалансированны (аномалий всегда гораздо меньше, на то они и аномалии, чтобы быть редкими), об этой метрике можно сразу забыть. Метрики precision и recall можно использовать по отдельности (ниже мы покажем самостоятельную важность метрики recall), но лучше воспользоваться их комбинациями, такими как метрика f1 или гармоническое среднее.

3.3.6. Раунды челленджа. Первый раунд. Отбираем одного эксперта и сравниваем его разметку с истинной разметкой (см. п. 3.3.3) по какой-либо комбинированной метрике, например, по метрике f1. Выбираем какую-нибудь калибровку (например, по классике, берём три сигмы) и по той же метрике сравниваем разметку детектора с истинной разметкой. Если оказывается, что метрика детектора выше метрики эксперта, то детектор победил в этом раунде. Второй раунд — делаем то же самое с разметкой второго эксперта и т. д. Если по итогам всех раундов окажется, что число побед детектора больше числа его поражений, то мы считаем, что детектор прошёл челлендж (здесь нам ещё раз помогает то, что мы пригласили именно нечётное число экспертов: равенство побед и поражений невозможно, и ничьей не будет при любом раскладе).

3.3.7. Коррекция калибровки. Однако, скорее всего, детектор проигрывает в первой итерации челленджа. Тогда мы изменяем калибровку (например, берём не три, а две сигмы) и повторяем процедуру. В случае очередной неудачи мы снова изменяем калибровку и т. д. Так, корректируя калибровку и сравнивая наши гипотезы об аномальности с истинным знанием, мы сможем, наконец, ответить на вопрос, который был задан давно и до сих пор висит в воздухе: какое отклонение модели от реальности считать сильным и признавать аномалией. Ответ — то, которое позволяет пройти челлендж.

3.3.8. Коррекция модели. Хорошо, если, подобрав в конце концов подходящую калибровку, мы с нашим детектором победим всех экспертов и пройдем челлендж. Хуже, если мы их так и не победим. Тогда придётся вернуться на этап моделирования, написать новую модель и заново пройти все этапы методики МССР (кроме, разумеется, этапа production, потому что нас никто не допустит к боевому применению детектора, пока не пройден челлендж).

3.4. Production. Реальное применение детектора аномалий в бизнес-процессе — это мониторинг. Допустим, детектор прошёл челлендж и внедрён в процессы управления и принятия решений (напомним, что в нашем случае речь идёт о процессах сервисного обслуживания автомобилей по гарантии). Все, чем мы можем быть полезны в этих процессах — вовремя (точнее, в режиме реального времени) сообщить об уже возникшей аномалии в той или иной локации (или, выражаясь в терминах нашей предметной области, в том или ином пункте гарантийного обслуживания). Мы не претендуем на разработку протоколов реагирования и уж тем более на исполнение этих протоколов, это прерогатива управляющего контура, наше

дело — вовремя сообщить, их дело — адекватно отреагировать. Отметим лишь одно общее место протоколов реагирования, характерное для большинства систем автоматического мониторинга.

Дело в том, что такие системы всегда опираются на принцип презумпции вины. Например, когда анализ банковских транзакций детектирует аномалию, она автоматически интерпретируется как недобросовестная, и карта пользователя блокируется, после чего начинаются проблемы пользователя, а не банка: он должен идти в ближайшее отделение и разбираться с тем, что произошло. И, в общем, это разумно, потому что если по каждой подозрительной транзакции банк будет проводить своё внутреннее расследование, работа банка будет парализована. Казалось бы, где банки, и где автосервис, но аномалии имеют универсальную природу (это то, что происходит редко, но всё-таки иногда происходит), и реакция на аномалии тоже универсальна. А в приложении к мониторингу пунктов гарантийного обслуживания презумпция вины означает, что когда детектор выдаёт сообщение об аномалии в какой-то локации, мы сразу же обвиняем в этом сервис и требуем объяснений: «Объяснительную на стол!». Так вот, это не самое умное решение.

Аномалия в работе сервисного центра может быть продиктована объективными причинами, например — погодой (буран, снежные заносы и т. д.), и тогда управляющий контур действительно получит полное и исчерпывающее объяснение. Но часть аномалий возникает по причине внутреннего корпоративного мошенничества и банальных приписок, и тогда управляющий контур тоже получит полное и исчерпывающее объяснение, только на этот раз оно будет ложью.

Какое отношение имеет ко всему этому наш детектор аномалий? — он же не детектор лжи, в конце концов. Давайте поставим себя на место владельца процесса и посмотрим на процесс его глазами: у нас есть производство, есть огромный парк выпущенных и проданных машин, и есть внушительная сеть сервисных центров, число локаций в которой исчисляется сотнями в масштабах страны. Чтобы отслеживать ситуацию (в частности, и для профилактики злоупотреблений), мы проводим постоянную проверку локаций, командируя по сервисным центрам комиссии (то есть, проводим ручной мониторинг пунктов гарантийного обслуживания). Но, поскольку локаций слишком много, мы применяем выборочный метод: каждый раз отбираем лишь несколько локаций и проверяем только их.

Теперь немного арифметики. Если аномальные состояния составляют 2% от всех наблюдений (а ниже мы покажем, что при калибровке на уровне трёх сигм процент аномалий будет примерно таков), то из всех наших проверок результативной будет одна проверка из пятидесяти, остальные сорок девять будут нерезультативны. Допустим, наш детектор обладает крайне низкой метрикой *precision*, например, возвращает в качестве аномальных не 2% локаций, а 20% (это чудовищный результат, позор для любого аналитика данных, но для примера пусть будет так). Но пусть при этом он обладает высокой метрикой *recall*: среди детектированных аномалий

присутствуют все (или почти все) истинные аномалии. Тогда выборочной проверке подлежат уже не все локации, а только те 20%, которые были помечены детектором как аномальные, и результативной оказывается уже каждая десятая проверка — результативность возрастает в пять раз, что совсем неплохо.

Это только один из возможных сценариев боевого применения детектора аномалий, и, разумеется, он не единственный. Но, повторимся, применения детектора не входит в зону нашей ответственности. Наше дело — детекция, и в следующих разделах мы покажем, как это делается, разобрав в рамках методики МССР этапы моделирования и калибровки.

4. Моделирование. Итак, у нас имеются наблюдения за некоторой характеристикой, которые проводились в разных локациях (в 59 пунктах гарантийного обслуживания) в течение некоторого времени (в течение 100 недель еженедельно). Нам нужно в каждый момент времени (то есть, каждую неделю), используя знания о значениях характеристики в одних локациях прогнозировать её значения в других локациях. Подчеркнём, что речь идёт о прогнозе не в смысле прогноза будущего значения характеристики, то есть, по времени, а в смысле прогноза её локационного значения, то есть, по географии. При этом нам никто не мешает использовать исторические сведения, например, в момент времени 2022-10-08 мы уже располагаем сведениями от 2022-10-01, и можем включить их в модель, но мы ещё не знаем, что будет 2022-10-15, а, значит, эту дату (и все последующие даты) включать в модель нельзя.

4.1. Метрика прогнозирующей эффективности. В качестве метрики эффективности будем использовать среднюю абсолютную ошибку: чем меньше она на тестовой выборке, тем выше прогнозирующая способность модели. Правда, здесь придётся сделать поправку на спецификацию стандартных процедур библиотеки `sklearn`, в которой используется отрицательная средняя абсолютная ошибка (так исторически сложилось, что алгоритмически удобнее максимизировать ошибку, а не минимизировать). Но эта поправка тривиальна: чем больше отрицательная средняя абсолютная ошибка модели, тем выше её прогнозирующая способность. И в конце концов, никто не мешает умножить отрицательную метрику на минус единицу, после чего получится обычная средняя абсолютная ошибка.

4.2. Выбор лучшей модели. Нам понадобится предварительное исследование, чтобы выбрать модель, которая лучше всего приспособлена к нашим данным, и мы формируем пул моделей:

```
model_list = [LinearRegression(),
               DecisionTreeRegressor(),
               SVR(),
               KNeighborsRegressor(),
               MLPRegressor(),
               RandomForestRegressor(),
               GradientBoostingRegressor()]
```

Модели задают итерации внешнего цикла. Далее, во внутреннем цикле для каждой даты мы формируем набор предикторов X (это значения характеристики в предыдущие моменты наблюдений) и переменную

отклика у (это значение характеристики в текущий момент) и проводим кросс-валидацию модели на 3 фолдах:

```
score_list = []
for N in range(1, len(data.columns)):
    X = data[data.columns[:N]]
    y = data[N]
    kf = KFold(n_splits=3, shuffle=True, random_state=42)
    scores = cross_val_score(model, X, y, cv=kf,
        scoring='neg_mean_absolute_error')
    score_list.append(scores.mean())
error = -np.array(score_list).mean()
```

В результате для каждой модели `model` из списка `model_list` получается значение метрики её эффективности, усреднённое по всем наблюдениям (поскольку использовалась отрицательная метрика, для получения окончательного значения ошибки мы меняем её знак). Эти значения для каждой из моделей представлены в следующей таблице:

model	error
LinearRegression	0.2113
DecisionTreeRegressor	0.2280
SVR	0.2058
KNeighborsRegressor	0.2648
MLPRegressor	0.3143
RandomForestRegressor	0.1794
GradientBoostingRegressor	0.1796

Лучшей моделью оказывается модель `RandomForestRegressor`.

4.3. Цикл по парам момент-локация. Исходные данные — это наблюдения характеристики для пар момент-локация. Всего таких пар 5900. Нам нужно для этих же пар получить прогнозируемые значения, соответственно, нужно прогнать вложенный цикл: внешний — по локациям (сверху вниз по таблице данных), внутренний — по датам (справа налево в каждой строке). Но это только для прогноза. А помимо прогноза, для классификации каждой пары момент-локация по принципу аномальности нам нужно знать сигму: тогда можно будет сравнить реальность с прогнозом и присвоить паре момент-локация гипотетическое значение нормы или аномалии (см. п. 3.2). Это требует ещё одной серии запусков (чем больше, тем точнее и стабильнее значение сигмы, ещё раз см. п. 3.2). Таким образом, дальше будет работать цикл с тремя уровнями вложенности, и все это для того, чтобы сформировать и заполнить ещё две таблицы помимо таблицы исходных данных: таблицу сигм и таблицу прогнозов.

Мы приведём код этого цикла, после чего снабдим его некоторыми комментариями.

```
data_std = pd.DataFrame(columns = data.columns, index = data.index)
data_prediction = pd.DataFrame(columns = data.columns, index =
data.index)
```

Здесь мы сформировали таблицы с той же структурой, что и таблица исходных данных (сначала это две пустые таблицы, все их значения равны NaN). После этого запускаем цикл и последовательно, слева направо и сверху вниз заполняем таблицы сигм и прогнозов:

```

for n in range(len(data)):
    data_reduce = data.drop(index = data.index[n])
    data_location = data.loc[data.index == data.index[n]]
    for k in range(1, len(data_reduce.columns)):
        X_reduce = data_reduce[data_reduce.columns[:k]]
        y_reduce = data_reduce[data_reduce.columns[ k]]
        error_serie = pd.Series([])
        for i in range(10):
            X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X_reduce, y_reduce, test_size=0.2)
            model = RandomForestRegressor()
            model.fit(X_train, y_train)
            y_pred = model.predict(X_test)
            error = y_pred - y_test
            error_serie = error_serie.append(error)
        std = error_serie.std()
        data_std[k][data.index[n]] = std
        model = RandomForestRegressor()
        model.fit(X_reduce, y_reduce)
        X_location = data_location[data_location.columns[:k]]
        y_location = data_location[data_location.columns[ k]]
        prediction = model.predict(X_location)
        data_prediction[k][data.index[n]] = round(prediction[0], 2)

```

Во внешнем цикле по n мы исключаем одну локацию, именно её мы будем прогнозировать: на данных `data_reduce` мы будем учить модель, а строку `data_location` подадим на вход обученной модели, чтобы получить предсказание.

В цикле по k мы добавляем в модель по одной дате, двигаясь по портрету зафиксированной выше локации от одной точки в начале цикла до полной истории наблюдений в его конце. Отметим, что цикл начинается с единицы, а не с нуля: в нулевой момент времени мы не можем построить никакую модель, кроме как посчитать среднее (см. п. 3.1). Таким образом, в наших итоговых таблицах `data_std` и `data_prediction` нулевой столбец останется незаполненным, мы это понимаем и сознательно идём на эту жертву.

Наконец, во внутреннем цикле по i мы вычисляем отклонения модели от реальности для данной пары момент-локация, запуская несколько раз (конкретно — 10 раз) процедуру разбиения на обучающую и тестовую выборки и вычисляя разницу между прогнозом на тесте и истинными значениями. В результате нескольких запусков накапливается достаточное количество ошибок в серии `error_serie` и, после выхода из цикла по i , мы вычисляем сигму при помощи стандартной процедуры `std` и заносим ее в таблицу `data_std`.

Далее, оставаясь в цикле по k , мы обучаем модель на редуцированных данных и делаем прогноз на данных локации, после чего заносим прогноз в таблицу `data_prediction`.

4.4. Результаты. Теперь у нас есть три таблицы с одинаковой структурой: таблица исходных данных `data`, которая была у нас с самого начала (см. п. 2), таблица прогнозов `data_prediction`:

	2022-10-01	2022-10-08	2022-10-15	...	2024-08-24
197240-XV	NaN	1.40	1.46	...	1.94
226293-ZV	NaN	1.75	1.60	...	2.04
228653-YW	NaN	1.70	1.35	...	1.83
...	...	...	...	...	...
992100-YW	NaN	1.31	1.25	...	1.27

и таблица сигм data_std:

	2022-10-01	2022-10-08	2022-10-15	...	2024-08-24
197240-XV	NaN	0.187323	0.250349	...	0.357828
226293-ZV	NaN	0.193254	0.217251	...	0.359164
228653-YW	NaN	0.216117	0.230529	...	0.297576
...	...	...	...	...	...
992100-YW	NaN	0.198353	0.263740	...	0.390569

5. Калибровка. Далее все совсем несложно. Берём разность между истинными и спрогнозированными значениями характеристики:

`data_difference = data - data_prediction`

Получаем таблицу отклонений data_difference:

	2022-10-01	2022-10-08	2022-10-15	...	2024-08-24
197240-XV	NaN	0.10	0.24	...	-0.04
226293-ZV	NaN	-0.35	-0.40	...	-0.04
228653-YW	NaN	-0.30	0.45	...	0.27
...	...	...	...	...	...
992100-YW	NaN	-0.01	0.15	...	0.33

Теперь у нас есть две ключевые таблицы: таблица отклонений data_difference и таблица сигм data_std, при помощи которых мы можем легко детектировать аномалии для разных пороговых значений отклонения.

5.1. Детекция аномалий. Как мы уже отмечали, мы можем по собственному произволу изменять величину отклонения, превышение которой мы будем считать аномалией (именно поэтому наши выводы на этапе калибровки ещё не являются истинными, а являются лишь гипотетическими). Давайте для начала применим классическое правило трёх сигм.

Используя логическое выражение, строим ещё одну таблицу data_detection (она и содержит искомую классификацию наблюдений по принципу норма/аномалия):

`data_detection = (abs(data_difference) > 3*data_std)`

	2022-10-01	2022-10-08	2022-10-15	...	2024-08-24
197240-XV	False	False	False	...	False
226293-ZV	False	False	False	...	False
228653-YW	False	False	False	...	False
...	...	...	...	...	...
992100-YW	False	False	False	...	False

Смотреть на нее неудобно, потому что мы видим лишь её фрагмент, где все пары момент-локация детектированы как нормальные. Есть ли там вообще аномальные? И если есть, то сколько их? Когда и где они наблюдались? Для ответа воспользуемся тем, что логические выражения можно складывать, причём, False соответствуют нулю, а True — единице.

`anomaly_counter = data_detection.sum().sum()`

Результат равен anomaly_counter = 124. С учётом того, что всего у нас 5900 наблюдений, аномальными оказываются 2.1% из них (вспомним, что в разделе 3.1 мы уже приводили в пример этот процент аномалий, когда говорили о выборочных проверках). Мы можем конкретизировать вывод какой-нибудь определённой датой, например, если нас интересует 2022-10-15, исполняем код:

`data_detection['2022-10-15'].loc[data_detection['2022-10-15'] == True]`

и обнаруживаем, что в момент времени 2022-10-15 в локации 587355-YX наблюдалось аномальное значение характеристики по сравнению с остальными локациями, а других аномалий в этот момент не было. Разумеется, так мы можем поступить с любой датой: в момент 2022-10-15 аномалии наблюдались в двух локациях: 746224-VX и 827401-YV и т. д.

Или нас может заинтересовать вопрос, в каких локациях аномалии наблюдались чаще всего. Ответить на него тоже совсем не трудно:

```
data_detection.sum(axis = 1).sort_values(ascending=False)
```

location	n	location	n	location	n	location	n
746224-VX	37	789368-VW	5	256962-UV	4	469299-ZV	1
827401-YV	18	402855-UX	4	289031-VX	2	656266-YU	1
429970-WV	16	587355-YX	4	833155-XU	2	539342-WZ	1
772200-YV	11	624285-ZU	4	792522-YU	1	888299-ZY	1
276170-YU	6	599193-ZV	4	269684-YV	1	437193-UW	1

В остальных локациях аномалии не наблюдались ни разу, а несомненным «лидером» по аномальным состояниям является локация 746224-VX.

5.2. Вариация пороговых отклонений. Изменяя коэффициент при сигме, мы тем самым, меняем порог толерантности, относительно которого детектируются аномалии, набор аномальных пар момент-локация при этом естественным образом меняется, и их количество тоже. Понятно, что чем больше коэффициент, тем меньше будет детектировано аномалий (см. рис. 4 из п. 3.2). При помощи несложного цикла (цикл берётся по коэффициенту от 1 до 33 с шагом 2) получаем последовательность количества аномалий и их процента от общего числа наблюдений:

```
coef_list = []
count_list = []
procent_list = []
for coef in np.arange(1, 34, 2):
    data_detection = (data_difference > coef*std)
    count = logical.sum().sum()
    procent = 100*count/5900
    coef_list.append(coef)
    count_list.append(count)
    procent_list.append(procent)
```

Видим, что какая-то одна из локаций демонстрирует в какую-то одну из дат немыслимое отклонение от других локаций величиной в 32 сигмы:

k	n	%	k	n	%	k	n	%	k	n	%
1	1104	18.71	11	9	0.15	21	5	0.08	31	1	0.01
3	124	2.10	13	7	0.11	23	4	0.06	33	0	0.00
5	46	0.77	15	5	0.08	25	4	0.06			
7	23	0.38	17	5	0.08	27	3	0.05			
9	13	0.22	19	5	0.08	29	2	0.03			

Движимые уже не научным, а чисто человеческим любопытством, пишем ещё один несложный цикл, и выясняем, что это за локация:

```
data_detection = (data_difference > 32*std)
for index in data_detection.index:
    for column in data_detection.columns:
        if data_detection[column][index] == True:
            print(index, column)
```

Оказывается, что такое отклонение от других локаций продемонстрировала 2024-06-08 локация 746224-VX, и почему-то нас это не удивляет. Мы уже видели эту локацию (см. п. 5.1) как наиболее частотную на уровне трёх сигм. Но выяснилось, что она не только самая частотная, но и наиболее аномальная.

Впрочем, поиск экзотических локаций — это не самое главное в процессе калибровки. Нам нужно пройти челлендж, то есть, подобрать такой порог толерантности, который наиболее соответствует мнению экспертной группы. И мы получили инструмент для челленджа.

6. Заключение. В рамках этой статьи мы не проводим челлендж (для этого необходимо мнение экспертного сообщества, а его у нас нет). Но можно порассуждать в жанре «что будет, если».

Если челлендж будет пройден удачно, мы передадим наш детектор боевому серверу, после чего управляющий контур получит инструмент мониторинга, действующий в режиме реального времени: вот момент, когда происходит обновление базы, включается детектор, на выходе которого возникает список локаций (возможно, это будет пустой список), аномальных по отношению к другим локациям в этот момент времени. Заметим, что при этом модель детектора будет каждый раз обучаться заново, то есть с изменением времени меняться будет и сама модель. В этом преимущество нашей методики МССР: она позволяет гибко реагировать на изменяющиеся обстоятельства, и это происходит именно потому, что в каждый момент времени модель формирует новые представления о том, что такое норма для данной локации, и что такое аномалия.

Если же мы не пройдём челлендж, то мы вернёмся на более ранние этапы методики: сначала за счёт изменения порога толерантности, а если это не поможет, то при помощи формирования какой-то новой модели с другими предикторами.

Список литературы

1. Хейдт М. Изучаем Pandas. Москва: ДМК Пресс, 2018. 438 с.
2. Бурков А. Машинное обучение без лишних слов. СПб: Питер, 2020. 192 с.
3. Вьюгин В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. М.: МЦИМО. 2013. 387 с.
4. Бринк Х. Машинное обучение / Х. Бринк, Дж. Ричардс, М. Феве-ролф. СПб.: Питер, 2017. 336 с.
5. Мосин В.Г. Обоснование методологии детекции аномалий в качестве нового цифрового инструмента управления качеством / В.Г. Мосин, В.Н. Козловский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 26, № 3, 2024, С. 16-22.
6. Заятров А.В. Анализ и оценка взаимосвязей между традиционными показателями надежности и показателями, используемыми ведущими производителями легковых автомобилей / А.В. Заятров, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 1. С. 41-43.

7. 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.

8. Козловский, В.Н. Методология анализа и прогнозирования качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, А.В. Заятров // Актуальные проблемы экономики. 2016. Т. 186. № 12. С. 387-398.

9. Козловский, В.Н. Комплекс обеспечения качества системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, Д.И. Панюков // Saarbrücken, 2014.

10. Козловский, В.Н. Моделирование электрооборудования автомобилей в процессах проектирования и производства / монография / Тольятти, 2009.

11. Козловский, В.Н. Проблема стратегического планирования улучшения качества и надежности системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, А.В. Заятров // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 1. С. 44-47.

12. Козловский В.Н. Надежность системы электрооборудования легкового автомобиля / В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. 2008. № 3. С. 37-40.

13. Панюков, Д.И. Новое руководство по FMEA: структурный анализ процессов / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2020. № 10. С. 36-42.

14. Козловский, В.Н. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1. / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 1. С. 40-49.

15. Козловский, В.Н. Стратегическое планирование конкурентоспособности с точки зрения качества / В.Н. Козловский, С.А. Шанин, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2017. № 3. С. 76-80.

16. 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., Кренинина Т.В., Бреусова Е.А., Фатеева С.В., Новоселов С.Н., Ульяницкая Н.М., Шаблыкин М.М., Буряков Г.А. и др. // Тольятти, 2013.

17. Немцев, А.Д. Моделирование - инструмент управления качеством продукции / А.Д. Немцев, В.Н. Козловский // Автомобильная промышленность. 2003. № 10. С. 1.

18. Панюков, Д.И. Формирование эффективной FMEA-команды / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, С.А. Шанин // Стандарты и качество. 2017. № 7. С. 68-72.

19. 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.

20. Kozlovsky, V.N. Calculation and statistical experiment on the monte carlo method when assessing the stability of the technical characteristics of the automobile generator set in mass production / V.N. Kozlovsky, V.E. Lysov, V.V. Ermakov, D.V. Antipov, D.F. Skripnuk // В сборнике: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. 2019. С. 565-568.

Мосин Владимир Геннадьевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, yanbacha@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Козловский Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Kozlovskiy-76@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Пантюхин Олег Викторович, д-р техн. наук, доцент, директор Издательства, olegpantyukhin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MCCP METHODOLOGY (MODELING, CALIBRATION, CHALLENGE, PRODUCTION) IN THE COMPARATIVE ANALYSIS OF CAR WARRANTY SERVICE POINTS

V.G. Mosin, V.N. Kozlovsky, A.S. Klentak, O.V. Pantyukhin

The article discusses the author's method of detecting abnormal states based on machine learning and big data analysis methods. The main stages of the methodology are described in the appendix to the data on car warranty service in the service centers of one of the leading domestic automakers and examples of the possible effect of its implementation are given.

Key words: quality management, automotive, warranty service, data analysis, times series, machine learning, regression, pandas, numpy, sklearn.

Mosin Vladimir Gennadievich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, yanbacha@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Kozlovsky Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, Kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

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

Pantyukhin Oleg Viktorovich, doctor of technical sciences, docent, Director of the Publishing House, olegpantyukhin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК КОМПОНЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

И.А. Беляева, В.Н. Козловский, А.С. Подгорный, Е.В. Пантюхина

Проектирование электромобилей имеет свою уникальность по сравнению с традиционными автомобилями имеющие двигатель внутреннего сгорания. Главным отличием от последнего варианта является адаптация электромобиля к электронным блокам, учет специфики подключения, получение отклика и сами компоновочные работы, где технически грамотно должны располагаться компоненты в подкапотном пространстве. Для моделирования использовался метод конечных-элементов, по результатам которых уточнялись те или иные параметры, возможности несущей конструкции и другие специфичные расчеты необходимые для проверки электромобиля перед сертификационными испытаниями.

Ключевые слова: качество, электромобиль, математическое моделирование, метод конечных элементов.

От разработки и проработки первоначального этапа проектирования электромобиля с реализацией последующего моделирования зависит качество конечного продукта, который должен удовлетворять не только потребительским свойствам, но и всем установленным требованиям, правилам, стандартам, установленным для прохождения сертификационных этапов уже готовой продукции [1, 2].

Кузовной каркас электромобиля представлен на рисунке 1.

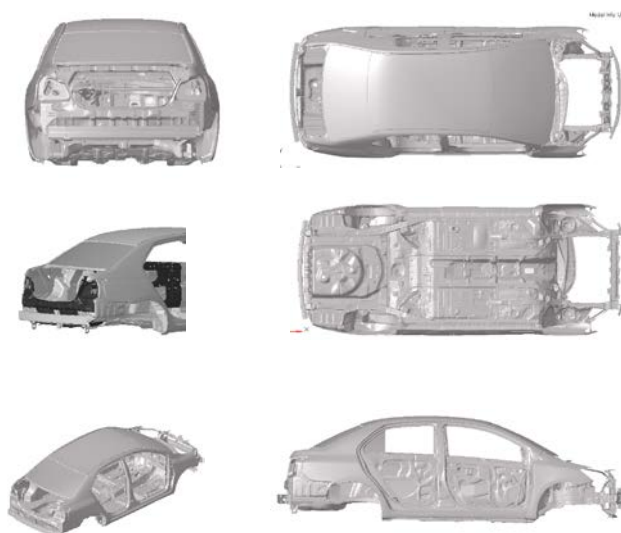


Рис. 1. Кузовной каркас электромобиля

От правильного проектирования и проработки расчетных моделей кузовного каркаса зависит не только качество электромобиля, но и главное – безопасность, что является важным параметром при определении

эксплуатационных характеристик разработанного электромобиля. В идеале, качество проектирования, расчетов определяет дальнейшие успешные работы по улучшению характеристик электромобиля [3, 4]. Например, удаление или добавление конструктивных элементов в кузов электромобиля для повышения прочностных характеристик отдельных его частей (рис. 2).

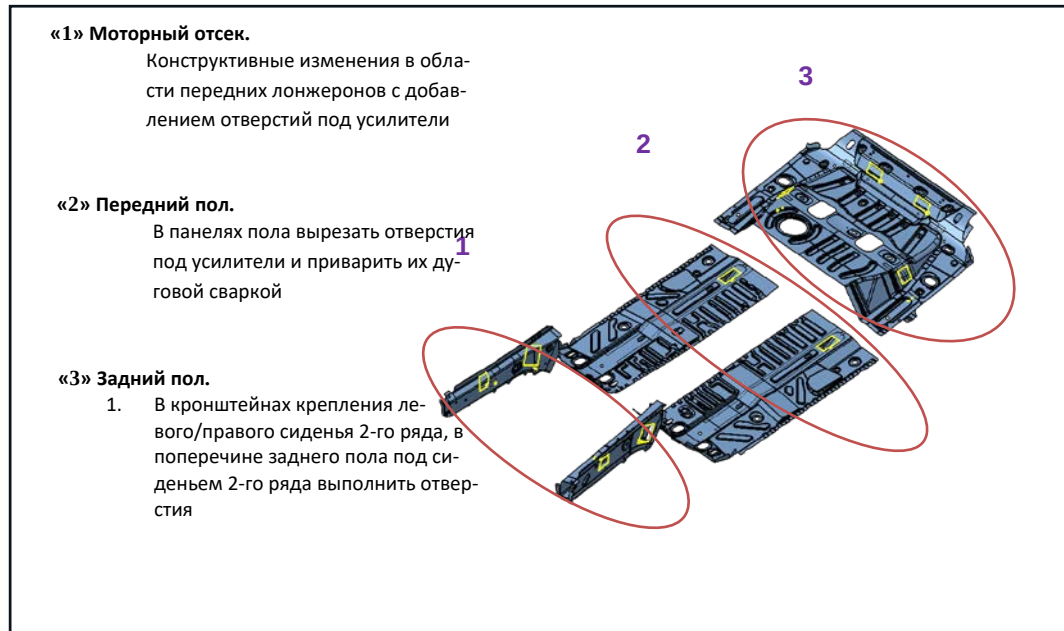


Рис. 2. Пример изменений в отдельных частях каркаса электромобиля

По сравнению с автомобилем с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), высокотехнологичный электротехнический комплекс электромобиля имеет способен заряжать не только аккумуляторные батареи, но и передавать информацию об общем режиме заряда электромобиля другим блокам, которые исходя от полученных сигналов передают уже свои данные [5].

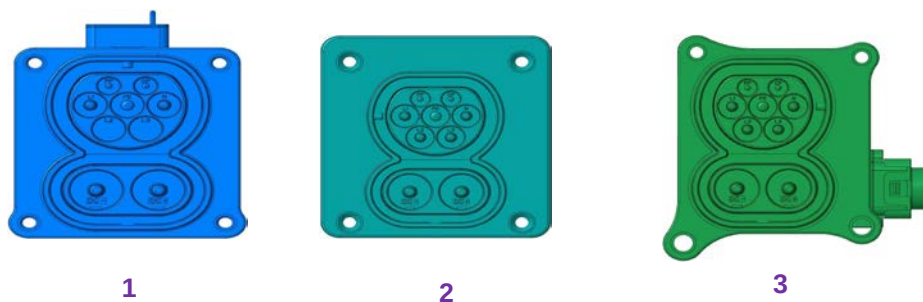


Рис. 3. Вариативность зарядных портов для электромобиля

Проектирование самих компонентов как для автомобиля с ДВС, так и для электрического варианта идентичен с точки зрения самого процесса. Отличием является - подбор расчетных компонентов, а также учет откликов относительно других блоков без возникновения ошибки, который в основном связан с правильным расчетом токовых характеристик. Простой

пример, возьмем зарядный порт (рис. 3). Необходимо, чтобы компонент не только установился на кузовной каркас задней части электромобиля в месте лючка автомобиля, но и выдавал определенные выходные данные [6].

На рисунке 3 показаны три варианта зарядных портов, с одной стороны точки фиксации данного компонента имеют небольшие отличия и, в принципе, можно было выбрать компонент по геометрическим характеристикам, но это была бы ошибка, которая напрямую влияет на конечное качество продукта, т.к. имеются определенные расхождения в токовых параметрах [7].

В первом варианте получаем:

- задний способ монтажа - задняя горизонтальная розетка;
- переменный ток: 2,5 мм² однофазный;
- постоянный ток: 16 мм².

Во втором варианте получаем:

- способ монтажа - хвостовой горизонтальный выход;
- переменный ток: 6 мм² трехфазный;
- постоянный ток: 70 мм²;

В третьем варианте получаем:

- фронтальный способ монтажа - правый выход 90° на конце;
- переменный ток: 6 мм² однофазный;
- постоянный ток: 70 мм².

Любой электромобиль имеет подключение высокого и низкого напряжения, которые объединены на электрической схеме и при проектировании необходимо параллельно делать расчет на токовые выходные данные и адаптировать каждый компонент под определенный электромобиль [8, 9].

После того, как компоненты подобраны по выходным параметрам, необходимо проработать компоновочные работы, с покомпонентной детализацией, вплоть до гаек и резинок, используемых на электромобиле. Главное, на что надо обратить внимание это то, как представлена 3D модель, а также как должна осуществляться закупка либо изготовление компонентой базы. Например, на машиностроительных заводах за каждую группу компонентов отвечает свой периметр, имеющий определенный внутренний номер. Электромобиль разделен на под сборки, за каждую из них отвечает свой отдел. Каждая под сборка имеет свой набор компонентов. Примером могут быть как жгутовые соединения (низковольтные жгуты, высоковольтные жгуты, коннектора и т.д.) (рис. 4), так и компоненты, отвечающие за термоменеджмент (шланги, трубки, фитинги, защитные рукава и т.д.). Подход к разным под сборкам одинаков. Главное – детализация и полная сходимость поставляемых компонентов с «замороженной» геометрией [10].

После того как геометрия всего электромобиля готова, компоновочные работы завершены и получены первые результаты по откликам электрических блоков, необходимо подготовить электромобиль к сертификационным испытаниям и пройти все правила необходимые для обеспечения безопасности всего электромобиля [11, 12]. С этой точки проекта начинаются работы по математическому моделированию как отдельных узлов, так

и всего электромобиля по разным правилам и расчетам (от статических вариантов до динамических). По результатам полученных данных должна идти обратная связь инжинирингу, которая занималась компоновочными работами и сориентировать их по итогам полученных данных со сравнением с результатами натурных испытаний [13]. С одной стороны подход идентичен с расчетами автомобиля с ДВС версией, но с другой стороны, необходимо помнить, что для электромобиля применяются дополнительные сертификационные испытания, например, правило R85, специфичное для электродвигателей со своими параметрами, которые не применяются в стандартных видах автомобилей.

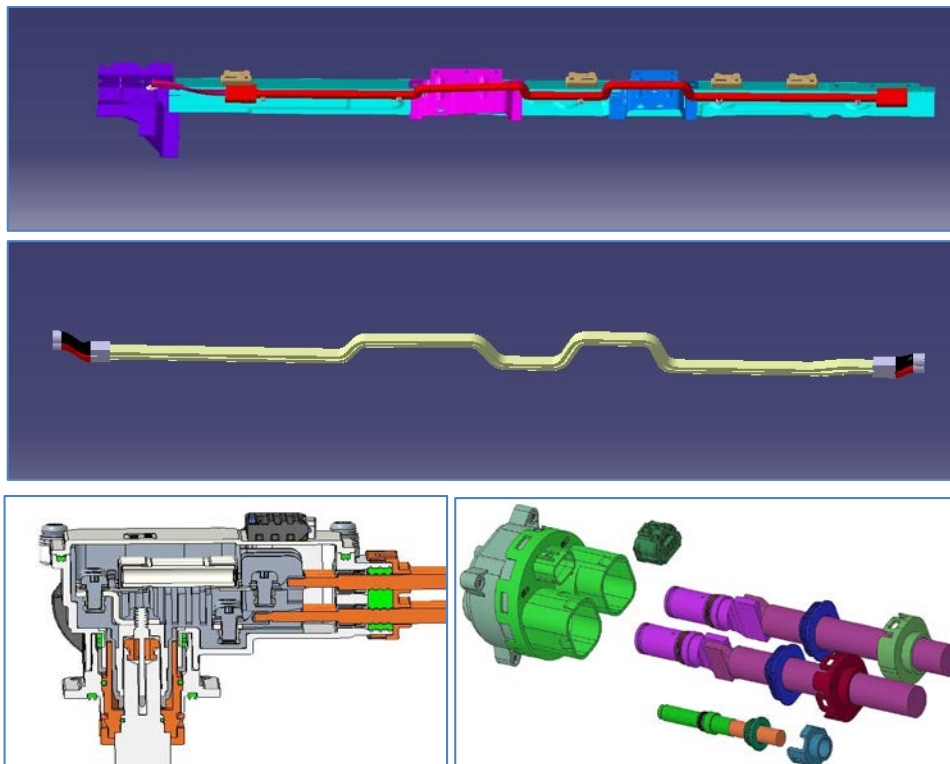
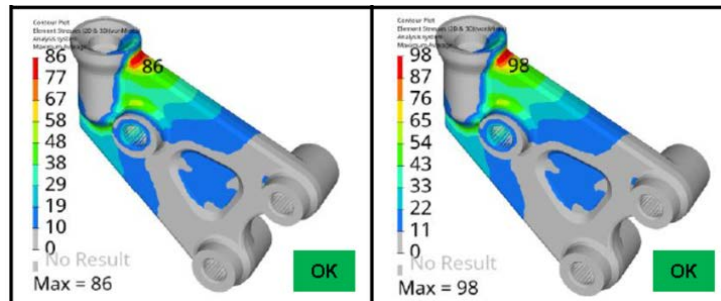


**Рис. 4 детализовка жгутового соединения
(общий вид и частные случаи)**

Длительные и дорогостоящие натурные тесты заменяются виртуальными расчетами, и в случае корректных вычислений (а степень их адекватности напрямую зависит от уровня компетенций исполнителя и валидационных корректировок) финальное натурное испытание перед изготовлением итогового изделия лишь подтверждает результаты цифрового моделирования [14, 15].

Математическое моделирование начинается с проектирования компонента и соединения их в одну модель. На данном этапе проекта объединяются несколько служб – конструктора, технологи и сами расчетчики. Благодаря полученным результатам, можно сделать вывод о пригодности того или иного изделия, о его прочностных характеристиках. Если при расчетах выявлены моменты, например, кронштейн не выдерживает нагрузку, то

компоненты усиливают и передают технологам для расчета на технологичность, конструктор проверяют изменения в общей компоновке автомобиля и возвращают расчетчикам для перепроверки нагрузочных характеристик (таблица 1).



первая сторона вторая сторона компонента

Рис. 5, Результаты расчетов на прочность кронштейна электромобиля

Далее формируется каркас электромобиля, где используются уже итоговые изделия. На этой стадии необходимо проверить, как ведет себя конструкция при объединении всех конструктивно годных компонентов (рис. 6).

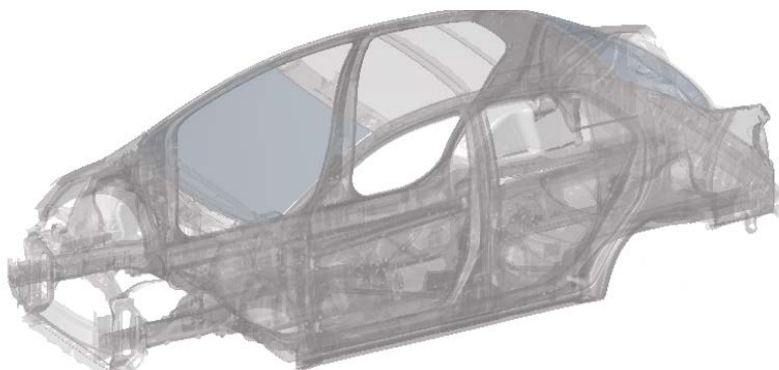


Рис. 6. Каркас электромобиля, подготовленный для математических расчетов

На рисунке 6 показан общий вид каркаса электромобиля. Для инженеров – расчетчиков этот файл является исходным, который в дальнейшем используется для определенного вида расчета, например, на жесткость и кручение. Данный тип моделирования считается стандартным как для автомобилей с ДВС версией, так и для электромобилей. Но, для проверки точности полученных результатов конечно- элементного моделирования в случае электромобиля, используют два этапа.

Первый этап, проверяется точность соответствующих результатов моделирования базовой конструкции; второй шаг – проверка статической жесткости кузова с блоком тяговых батарей, чтобы уточнить коэффициент отклонения от натурных испытаний (рис. 7). В результате получили незначительное увеличение статической жесткости, отличные данные по вопросам кручения и модального анализа.



Рис.7. Натурные испытания на жесткость кузова

На этапе натурных испытаний при использовании предписанной нагрузки, близкой к заданной в расчетных задачах, показания результатов записываются через условные точки и передаются в файле для сравнения результатов. Полученные данные отображаются через графики и, если отклонение не более 10 % считается, что расчёт корректный и удовлетворяет всем параметрам, а полученная математическая модель может использоваться для дополнительных расчетных случаев и рассматриваться как инструмент для повышения качества как отдельных частей конструкторской деятельности по проектированию компонентов, так и общего математического подхода ко всему электромобилю. Корреляция между конечно-элементными моделями и экспериментальными данными испытаний имеет решающее значение для обеспечения точных прогнозов в решениях необходимых задач.

Проектирование и конечно-элементный анализ напрямую влияет на конечное качество изготавливаемого продукта. Благодаря полученным результатам имеется возможность спрогнозировать поведение конструкции под разными нагрузками. При обнаружении несоответствий между результатами конечно – элементных моделей и натурными испытаниями имеется возможность заранее провести процесс корреляции различных расчетных методов, повысив при этом качество и надежность продукта на этапе проектирования. При этом появляется возможность принимать соответствующие технические решения и контролировать весь жизненный цикл электромобиля.

Список литературы

1. Козловский, В.Н. Мониторинг удовлетворенности потребителей качеством автомобилей / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2016. № 6. С. 100-105.
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. Николаев П.А. Оценка соответствия автомобилей требованиям по мехоустойчивости к внешним электромагнитным воздействиям / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорный // Грузовик. 2017. № 10. С. 44-48.
4. Панюков Д.И. Моделирование процедуры FMEA: анализ рисков / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 9. С. 34-43.
5. Панюков Д.И. Программное обеспечение для поддержки метода FMEA / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 6. С. 42-49.
6. Слукин А.М. Имитационное моделирование электронной системы определения вязкости масла в силовом агрегате автомобиля / А.М. Слукин, В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.В. Иванов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 5. С. 2-4.
7. Саксонов А.С. Расчетно-статистический эксперимент по методу Монте-Карло как основа инструмента управления качеством транспортных электромеханических преобразователей / А.С. Саксонов, В.Н. Козловский, А.В. Крицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 6. С. 286-292.
8. Панюков Д.И. Моделирование процедуры FMEA: методология и стратегия / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 7. С. 30-38.
9. Панюков В.Н. Моделирование процедуры FMEA с ИТ-поддержкой в нотации BPMN / В.Н. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 12. С. 28-35.
10. Козловский В.Н. Оценка реакции автопроизводителя на запросы потребителей / В.Н. Козловский, Г.Л. Юнак, Д.В. Айдаров, С.А. Шанин // Стандарты и качество. 2017. № 6. С. 80-85.
11. Козловский В.Н. Имитационная модель зарядного баланса автомобильного электрооборудования / В.Н. Козловский, Д.И. Гурьянов, А.Д. Немцев // Автотракторное электрооборудование. 2002. № 5-6. С. 12
12. Козловский В.Н. Прогнозирование потребительской ценности качества автомобилей / В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, Д.И. Благовещенский, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2021. № 2. С. 96-103.
13. Панюков Д.И. Моделирование процедуры FMEA: структура и функции / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 8. С. 36-41.
14. Aydarov D. Remote monitoring system for quality assessment of car service enterprises / D. Aydarov, V. Kozlovskiy, V. Vakhnina, S. Kleymenov // Quality - Access to Success. 2019. T. 20. № 170. С. 85-89.
15. Панюков Д.И. Анализ системы оценивания риска на основе приоритета действий в методе FMEA / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, М.В. Шакурский // СТИН. 2022. № 8. С. 45-49.

Беляева Ирина Александровна, канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник, toe_fp@samgtu.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Козловский Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Kozlovskiy-76@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Подгорный Александр Сергеевич, канд. техн. наук, научный сотрудник, zxsvbnm89207@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

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

FINITE ELEMENT MODELING AS A COMPONENT OF ELECTRIC VEHICLE QUALITY ASSURANCE IN THE DESIGN PROCESS

I.A. Belyaeva, V.N. Kozlovsky, E.V. Pantyukhina

The design of electric vehicles has its own uniqueness compared to traditional vehicles with an internal combustion engine. The main difference from the latter option is the adaptation of the electric vehicle to electronic units, taking into account the specifics of the connection, receiving feedback and the layout work itself, where the components in the underhood space should be technically correctly located. For modeling, the finite element method was used, based on the results of which certain parameters, the capabilities of the supporting structure and other specific calculations necessary for checking the electric vehicle before certification tests were clarified.

Key words: quality, electric vehicle, mathematical modeling, finite element method.

Belyaeva Irina Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent, toe_fp@samgtu.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Kozlovsky Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, Kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Podgorny Alexander Sergeevich, candidate of technical sciences, professor, zxsvbnm89207@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

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

УДК 338.245 (470)

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-297-298

МЕТОДИКА КОМПЛЕКТОВАНИЯ ВЫЕЗДНЫХ БРИГАД СПЕЦИАЛИСТАМИ РАЗНОГО ПРОФИЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА В МЕСТАХ БАЗИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОЛИГОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин

Анализируются причины, негативно влияющие на процесс выполнения технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования в местах базирования, связанные с отсутствием системного подхода при формировании выездных бригад. На основе выявленных проблем были предложены методы, позволяющие предприятию систематизировать процесс подбора специалистов и подойти к составлению бригад в зависимости от предстоящих задач. Данные меры позволяют проводить выездные ремонтные работы в местах базирования с меньшими затратами по времени и сделать сам процесс более предсказуемым.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, полигонное оборудование, систематизация процесса, ремонтные бригады, ритмичность производственного цикла.

Управление персоналом - это целенаправленная деятельность со стороны руководителей предприятия различных уровней, а также работников подразделений структуры управления персоналом, включая разработку принципов кадровой политики и систем управления. Под кадровой службой понимают совокупность структурных подразделений основу содержания которых составляют: формирование кадров предприятия, развитие навыков и умений работников, совершенствование организации труда. Говоря о методах управления персоналом, необходимо учитывать специфику работ предприятия и условия их проведения. Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) полигонного оборудования, может проводиться, как в условиях полигона на необорудованной площадке, так и в условиях предприятия из-за чего процесс комплектования бригад в некоторых случаях может принципиально отличаться. Данную особенность необходимо учитывать персоналу по подбору кадров, а также управляющему составу при организации работ. Если проведение ТОиР полигонного оборудования в условиях предприятия достаточно предсказуемый процесс, к ритмичности которого возникает наименьшее число вопросов, то проведение работ в условиях полигона представляет собой достаточно хаотичный процесс, имеющий высокую степень неопределённости.

Задачей отдела по подбору персоналу, является поиск специалистов разного профиля, для выполнения поставленных задач перед предприятием. Особой ценностью будут пользоваться специалисты широкого профиля способные единолично проводить работы по самому широкому спектру задач. Для грамотной организации поиска кадров, кадровикам следует быть в плотном контакте с начальниками производств для понимания актуальных потребностей предприятия.

При формировании выездной бригады, начальнику производства следует исходить из стоящих задач перед группой. Понимания характер предстоящего ремонта, он может составлять бригады по принципу разделения труда и объёму работ. Специализация персонала в бригаде может быть узконаправленной, рассчитанной на выполнение разных операций, иметь частичное разделение труда или иметь полную взаимозаменяемость. Если ремонт представляет собой лишь только замену блоков, то в таком случае бригада может состоять из специалистов одного профиля, а их численность будет определяться количеством изделий.



Рис. 1 Структура группы для решения конкретного вида задач.

В случае различных видов поломок либо высокой неопределённостью, группу следует комплектовать специалистами широкого профиля. Такая компоновка позволит повысить процесс выполнения ТОиР на полигоне в случае недостаточных данных о поломках.



Рис. 2 Структура группы для решения разного типа задач

Организованный подход к формированию выездных бригад, для выполнения ТОиР полигонного оборудования в местах базирования не может быть хаотичным и должен проводиться исходя из стоящих задач перед производством. Для подбора специалистов в достаточном объёме и нужного профиля, отдел кадров обязан иметь рабочий контакт с управляющим персоналом и чем выше степень их взаимодействия, тем больше свободы выбора имеют вторые при формировании выездных бригад. Грамотный подход к комплектованию бригады в каждом конкретном случае, позволит увеличить уровень ритмичности процесса ТОиР в местах базирования и как следствие повысить эффективность организации, проводящую такие работы.

Список литературы

1. Кислов А.К., Фролов А.В. Россия и международный рынок оружия. Идеология и практика. М.: Альфа-Браво, 2009. 544 с.

2. Буренок В.М., Лавринов Г.А., Хрусталеv Е.Ю. Механизмы управления производством продукции военного назначения. М.: Наука, 2006. 304 с.
3. Луцкий С.Я., Ландсман А.Я. Корпоративное управление техническим перевооружением фирм. М.: Высшая школа, 2003. 320 с.
4. Основы современного социального управления: Теория и методология: учеб. пособие / под ред. В.И. Иванова. М.: Экономика, 2000. 269 с.
5. Панюков Д.И., Козловский В.Н., Слнстина Г.Г. Проектирование новых производственных процессов // Стандарты и качество. 2014. №11. С. 92-95.
6. Аристов А.И., Карпов Л.И., Приходько В.М. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования. М.: ИЦ Академия, 2013. 416 с.
7. Шваб А. Менеджмент для инженеров. М.: ПапиРус, 2001. 432 с.

Лукьянов Андрей Евгеньевич, инженер, andrey238468@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет, АО «Тулаточмаш»,

Пантюхин Олег Викторович, д-р техн. наук, доцент, директор Издательства, olegpantyukhin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE METHODOLOGY OF RECRUITING FIELD TEAMS WITH SPECIALISTS OF VARIOUS PROFILES TO CARRY OUT MAINTENANCE AND REPAIRS AT THEIR LOCATIONS USING THE EXAMPLE OF LANDFILL EQUIPMENT.

A.E. Lukyanov, O.V. Pantyukhin

The reasons that negatively affect the process of performing maintenance and repair of landfill equipment at their locations are analyzed, related to the lack of a systematic approach in the formation of field teams. Based on the identified problems, methods were proposed that allow the company to systematize the process of selecting specialists and approach the composition of teams depending on the tasks ahead. These measures make it possible to carry out on-site repair work at their locations with less time and make the process more predictable.

Key words: maintenance and repair, landfill equipment, process systematization, repair teams, rhythmic production cycle.

Lukyanov Andrey Evgenievich, engineer, andrey238468@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University, JSC Tulatochmash,

Pantyukhin Oleg Viktorovich, doctor of technical sciences, docent, Director of the Publishing House, olegpantyukhin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7.043

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-300-301

**МЕТОДИКА СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА AlSi10Mg
(RS300) ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

А.Н. Петров, Н.А. Бессонова, П.А. Петров, Т.С. Басюк, Б.А. Логинов

Статья посвящена проверке методики исследования микроструктуры алюминиевого сплава RS-300 после деформирования в изотермических условиях. Макроструктура изучена с использованием оптического микроскопа; микроструктура - с помощью электронного микроскопа. Гранулометрический анализ и исследование шероховатости поверхности выполнено с применением сканирующей зондовой микроскопии. Разработана методика исследования сплава RS-300 на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000. Методика включает технологию изготовления шлифов и технологию определения размеров зерен и шероховатости поверхности. Определены оптимальные режимы химического травления (время и концентрация химического раствора) образцов сплава RS-300. Получены кадры микроструктуры, и определены размер зерна и шероховатость поверхности.

Ключевые слова: алюминиевый сплав RS-300, AlSi10Mg, горячая изотермическая штамповка, аддитивное производство, микроструктура, электронная микроскопия

В настоящее время, аддитивные технологии широко осваивают в разных отраслях промышленности: автомобильной, авиационной, аэрокосмической, в биомедицине, двигателестроении и других отраслях, благодаря своим преимуществам. Методы аддитивного производства (АП) позволяют снизить затраты на подготовку производство, на материалы и трудоемкость.

Применение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (далее – SLM), в частности, в технологических процессах горячей изотермической деформирования является актуальным; дает возможность снизить материальные затраты на инструмент и на материал заготовок в случае изготовления малых серий штампованных изделий с заданным уровнем эксплуатационных свойств. Однако есть проблема, которая ограничивает применение этой технологии в производство: однородность структуры и механические свойства. Заготовки, полученные по технологии SLM, могут иметь пористость, для устранения которой применяют различные

способы, в том числе пластическую деформацию при различных температурах или технологии изостатического прессования [1, 2]. Пластическая деформация может быть выполнена по схеме объемной калибровки в изотермических условиях в штампе [3-5]. С экономической точки зрения, этот способ изменения свойств полуфабриката может быть более предпочтительным в сравнении с дорогостоящей технологией изостатического прессования.

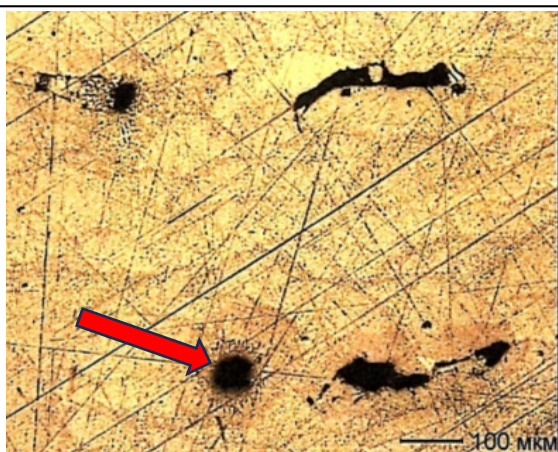
Исходя из краткого обзора полученных ранее результатов [6] по теме данной статьи, входной контроль металлического порошка сплава RS-300 (AlSi10Mg) включает проверку химического и гранулометрического состава, согласно паспорту на материал. Контроль свойств исходного порошка до SLM осуществляется согласно ГОСТ Р 59035. Для входного контроля использовалось следующее оборудование: атомно-абсорбционном спектрометре AA 280FS, оптический микроскоп Axiovert 40MAT и бинокулярный микроскоп Stemi-2000C.

В работе [6] исследована структура (макро- и микро-) исходных образцов, изготовленных по технологии SLM, а также образцов после SLM и горячей изотермической деформации методами оптической и электронной микроскопии с применением микроскопов Nexcope NM910-R и FEI Quanta 650, соответственно. Форма образцов – цилиндрические и в кольцевые. На рисунке 1 приведены типовые результаты исследования в продольном и поперечном направлении микроструктуры кольцевого образца из сплава RS-300, изготовленного по технологии SLM до горячей изотермической деформации [6].

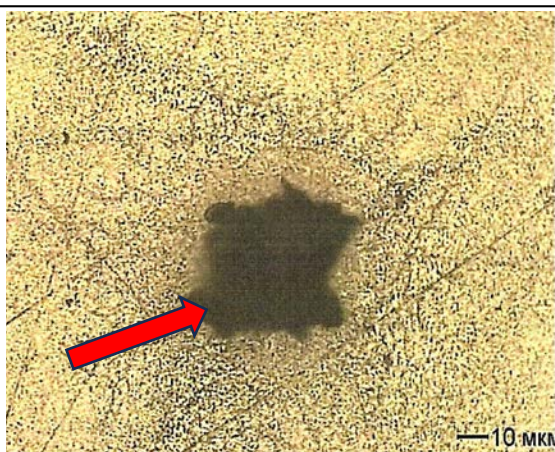
В материале наблюдается наличие редких пор округлой формы (красная стрелка на рисунке 1); имеются гранулы, несплавленные с основным материалом; несплошности по контуру и участки усадочной рыхлоты (синяя стрелка на рисунке 1). В поперечном направлении структура имеет слоистое строение похожее на «чешуйки» с четкими контурами вероятных границ сплавления в виде тонких линий. В продольном направлении структура представляет собой слоистое строение похожее на пластины, ориентированные в разных направлениях с четким контуром. Микротвердость по Виккерсу (HV) при нагрузке 100 грамм составляет 139...141 кгс/мм².

На рисунке 2 показаны некоторые результаты исследования макромикроструктуры на оптическом и электронном микроскопе образца сплава RS-300 после SLM и горячего изотермического деформирования. Макро и микроструктуру исследовали в поперечном сечении. Подготовка шлифов выполнялась с применением процессов резки, шлифования и полирования с последующей обработкой в растворе плавиковой, азотной и серной кислот, по стандартной технологии для алюминиевых сплавов.

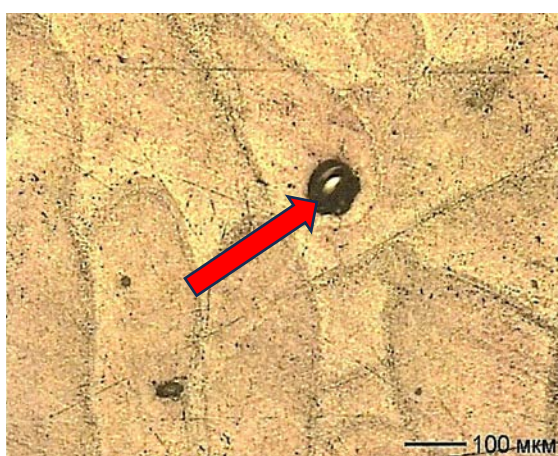
Исследование показало [6], что макро- (рисунок 2) и микроструктура (рисунок 3) однородная, мелкодисперсная, без деформационных дефектов, характерная для деформированного материала.



1 - увеличение 100 крат



2 - увеличение 500 крат

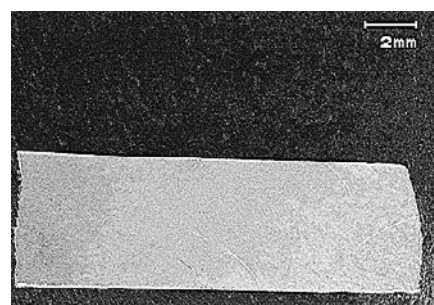


3 - увеличение 100 крат



4 - увеличение 500 крат

Рис. 1. Микроструктура исходного кольцевого образца из сплава RS-300



Макрошлиф, увеличение 100 крат

Рис. 2. Кольцевой образец из RS-300: 1 - после деформирования и вырезки заготовки для шлифа; 2 – шлиф для исследования макро-микроструктуры

Цель работы – определение размеров зерна и шероховатости поверхности. Для достижения цели, необходимо разработать методику исследования структуры сплава RS-300 до и после горячей изотермической деформации на зондовом микроскопе СММ-2000. Количественные показатели, которые оцениваются при этом, - размер зерна, при наличии

сформированной кристаллической структуры, и шероховатость поверхности. Данная работа является продолжением исследования, часть результатов которого описана в работе [6].

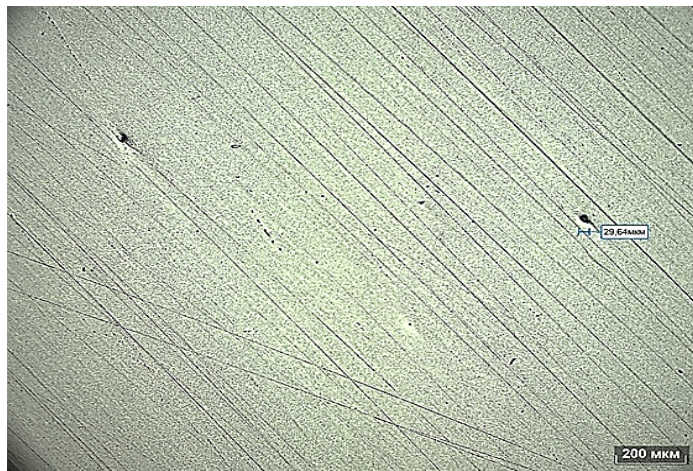


Рис. 3. Микроструктура кольцевого образца RS-300 после деформации (осадки), увеличение 100 крат

Экспериментальная часть. В работе [6] для проведения исследования изготовлено по технологии SLM 15-ть кольцевых образцов, размером $D \times d \times H = 40 \times 20 \times 14$ мм. Все образцы подвергнуты деформированию на гидравлическом прессе в условиях близких к изотермическим. На рисунке 2 показан образец № 01 после деформирования (осадки).



Рис. 4. Шлифы для исследования на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000: первый ряд: 14-15; 04-05; 06-07; второй ряд: 12-13; 08-09; 02-03; средний 10-11

Из каждого кольцевого образца №№ 02-15 после изотермического деформирования (осадки) вырезаны заготовки в поперечном направлении (рисунок 2) и подготовлены 14-ть шлифов (рисунок 4). Подготовка шлифов выполнялась по стандартной технологии: вырезка заготовки для шлифа (см.

рисунок 2), заливка полимером, черновая и чистовая механическая обработка, полировка (рисунок 4). Заливка осуществлялась в форму по две заготовки в каждую форму.

Для исследований микрорельефа использован «Микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000», изготовитель АО «Завод ПРОТОН», г. Зеленоград (www.microscopy.su). Кадры топографии поверхности получены в режиме атомно-силовой микроскопии (далее - АСМ), в последнее время активно применяемой для исследования морфологии и микроструктуры поверхности изделий из металлических сплавов, подвергнутых разным видам обработки [7, 8]. В качестве зондов использованы кантилеверы с радиусом закругления острия 10 нм марки «CSG-01» (Швейцария). Микроскоп позволяет видеть объекты до 10 нм по латеральным размерам. За счёт того, что каждая точка кадра микроскопа – это измеренная с точностью до 0,2 нм высота рельефа – можно делать измерение высот элементов поверхности и вычислять параметры шероховатости.

Все образцы исследованы в центральной части, не ближе, чем 1 мм от края. Для установки образцов в микроскоп СММ-2000, из-за их больших габаритов и связанного с этим риском ухудшения разрешающей способности микроскопа из-за уменьшения частот основного механического резонанса и его гармоник, по аналогии был спроектирован и изготовлен специальный держатель [9, 10], интегрированный (рисунки 5, 6) со стандартным столиком микроскопа СММ-2000 [11, 12].



Рис. 5. Специальный держатель образцов



Рис. 6. Специальный держатель образцов в микроскопе СММ-2000

Методика исследования на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000. Первые же кадры микроструктуры поверхности, снятые в сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 – показали, что поверхность полированных до зеркального состояния образцов (рисунок 4) содержит на микроуровне большое количество борозд от полировки поверхности абразивными частицами (рисунок 7).

Такая поверхность не подходит для исследования микроструктуры, поэтому первая часть разрабатываемой методики включала разработку оптимальных режимов травления поверхности, позволяющих «выход» зерен металла на поверхность. В качестве реактива использована гидроокись калия КОН.

Для проведения опытов по травлению, из образца №04 было вырезано 10 тестовых пластинок толщиной 1 мм на эрозионном станке, после чего эти пластинки заполировали до зеркального блеска.

Далее, каждую пластинку погружали на разное время в раствор КОН при температуре 20°C, после чего быстро доставали и промывали в чистой воде. Первая пластина была погружена на время 0,5 минут, вторая на 1 минуту, и так далее, десятая пластина была погружена на 5 минут. Концентрация раствора КОН была выбрана на уровне 1,5 моль/л. При этом был выполнен расчёт концентрации для сухого вещества КОН $19,2 \text{ г. на } 200 \text{ мл воды: } 19,2:56,1:0,2=1,7 \text{ моль/л}$, и учтена поправка на содержание воды в поставляемом в гранулах КОН.

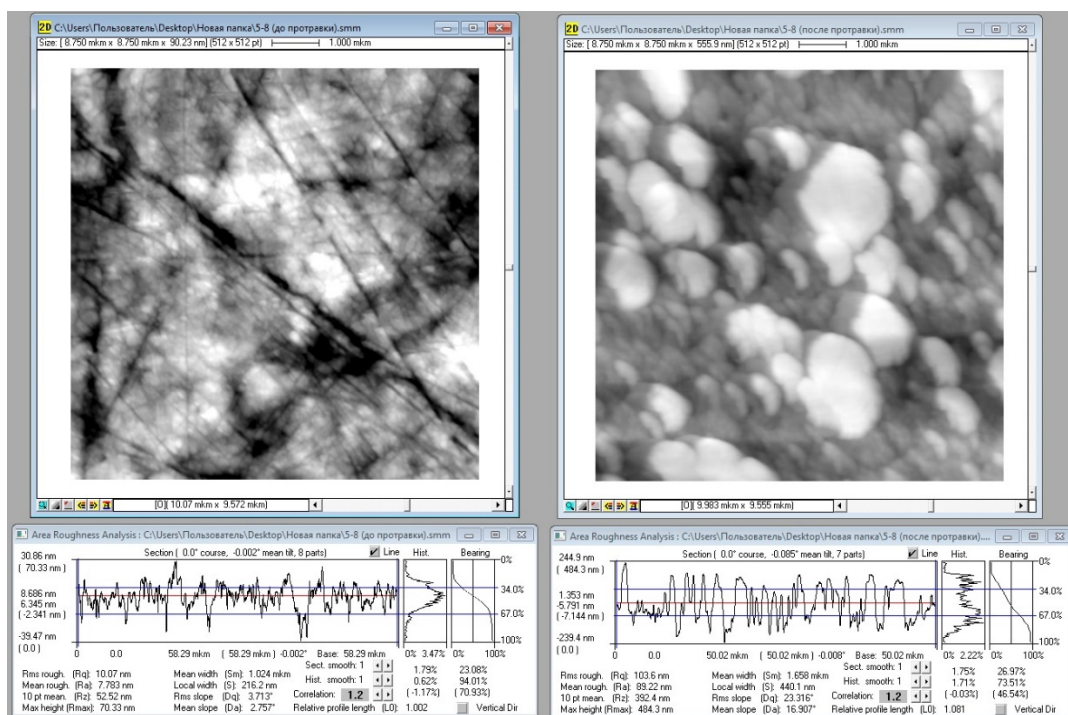


Рис. 7. Предварительный просмотр образцов на СММ-2000: слева до травления; справа-после травления

После рассмотрения в оптическом микроскопе ЛОМО МЕТАМ Р-1 всех протравленных пластинок было установлено, что при обработке в течение одной минуты дефекты от полировки уже окончательно исчезают (рисунок 8) и пластинка сохраняет чистоту поверхности, но при увеличении времени травления на пластинках появляется чёрный налёт, который может искажать данные о микроструктуре сплава. Возможно, это связано с химическим составом сплава.

Просмотр в сканирующем зондовом микроскопе пластинки, протравленной в течение 1 минуты, показал, что разброс высот на поверхности после протравки составляет около 100 нм, что вполне приемлемо для получения хорошего контраста исследований в зондовом микроскопе. Поэтому для всех 14-ти образцов с изотермическим деформированием было принято время травления 1 минута.

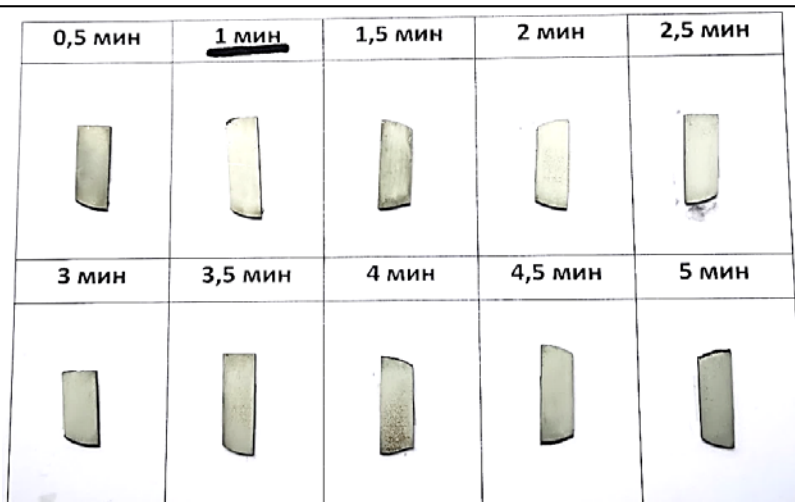


Рис. 8. Тестовые образцы (пластинки) после травления в водном растворе КОН

Методика измерений на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000. Методика измерений образцов в сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 выбрана для всех образцов №№ 02-15 единой, для последующего корректного сравнения результатов. Алгоритм методики зондовой микроскопии следующий:

1. Задание размера кадра около 8×8 мкм в боковом направлении, который был выбран на первых образцах, исходя из того, что на таком кадре для получения достаточной статистики помещается более 100 зёрен материала и более 10 агломератов из этих зёрен, которые наблюдались на всех образцах;
2. Анализ полученного кадра на три основных параметра шероховатости (рисунок 9): R_a (средняя шероховатость), S (средний размер зёрен) и S_m (средний размер агломератов из зёрен);
3. Гранулометрический анализ статистики размеров зёрен;
4. Гранулометрический анализ статистики размеров агломератов из зёрен.

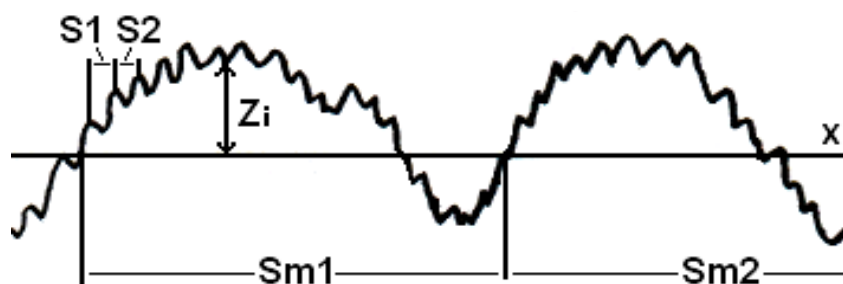


Рис. 9. Параметры шероховатости: R_a – среднее от отклонений Z_i всех точек профиля по вертикали от средней линии профиля X ; S_m – среднее от расстояний S_{m1} , S_{m2} ... по горизонтали между пересечениями профилем средней линии при ходе профиля вверх; S – среднее от расстояний S_1 , S_2 ... по горизонтали между максимумами профиля

Все виды численного анализа (анализ шероховатости и гранулометрический анализ) выполнены штатным программным обеспечением микроскопа СММ-2000. Расчет параметров шероховатости производился в соответствии с международным стандартом ISO 4287.

Результаты измерений на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000. На рисунках 10, 11, 12 и 13 ниже приведены кадры с краткими комментариями, полученные на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 на одном из образцов и которые являются характерными также и для всех 14-ти образцов.

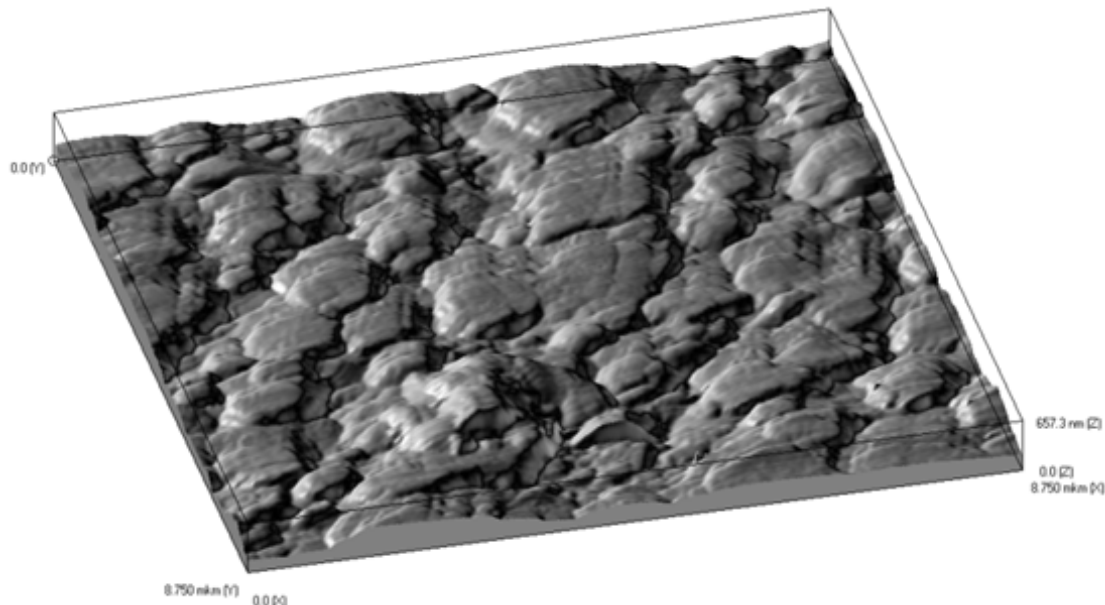


Рис. 10. Кадр образца № 02 в 3-х мерном виде, для наглядности рельефа поверхности образца

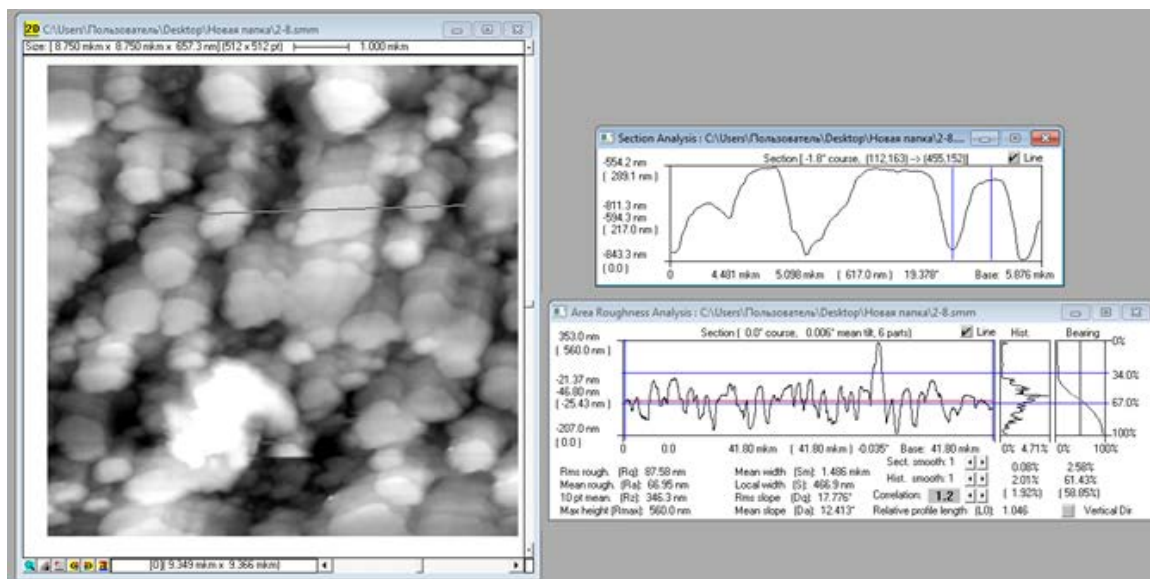


Рис. 11. Кадр образца № 02 в 2-х мерном виде, с окном анализа шероховатости (справа внизу), и окном анализа сечения (справа вверху) по отрезку, заданному оператором по кадру слева

Размер кадра 8,75 x 8,75 мкм задан оператором, а полный разброс высот 657 нм был автоматически вычислен программным обеспечением микроскопа СММ-2000 после получения всего кадра.

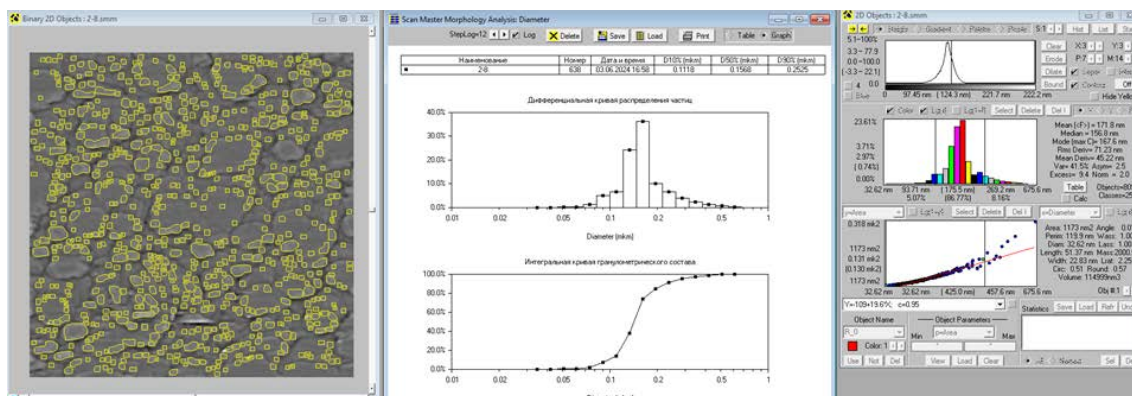


Рис. 12. Кадр образца № 02 в 2-х мерном виде, с выделением зёрен путём их оконтуривания, со статистикой распределения зёрен по диаметрам (в окне по центру) и с параметрами этой статистики (в окне справа)

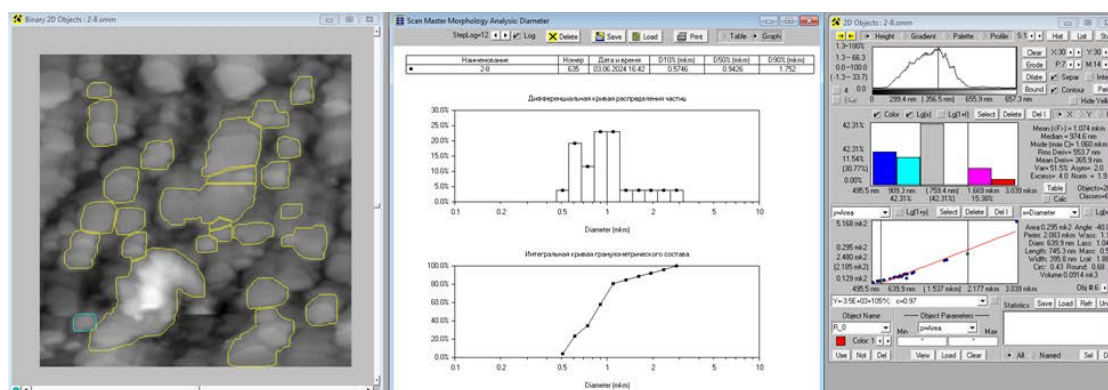


Рис. 13. Кадр образца № 02 в 2-х мерном виде, с выделением агломератов зёрен путём их оконтуривания, со статистикой распределения агломератов по диаметрам (в окне по центру) и с параметрами этой статистики (в окне справа)

Результаты исследования на СММ-2000

№ образца	Уровень 10%		Уровень 50%		Уровень 90%		Ra, нм после травления
	агло- мераты	зерна	агло-ме- раты	малые зерна	агло-ме- раты	малые зерна	
средние значения							

Результаты анализа исследования размеров зерен, их агломератов, а также шероховатости поверхности для всех исследованных 14-ти образцов приведены в таблице 1. Уровням 10%, 50% и 90% соответствуют диаметры объектов (зёрен или агломератов) в начале распределения по диаметрам (на уровне 10% от начала, т.е. это диаметры малых объектов), в середине распределения (на уровне 50% от начала, т.е. это диаметры среднестатистических объектов) и в конце распределения (на уровне 90%, т.е. диаметры больших объектов).

Выводы:

1. Разработана методика исследования микроструктуры алюминиевого сплава RS-300 после деформирования в изотермических условиях и методика измерений основных количественных параметров: размер зерна, шероховатость поверхности.

2. Исследование на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 позволило изучить морфологию микроструктуры сплава RS-300, полученного методом SLM, после деформирования в изотермических условиях, а также определить размеры зерен, образующихся из них агломератов и шероховатость поверхности. Расчет размеров выполняется в автоматизированном режиме с учетом статистики.

3. Работу планируется продолжить и выполнить одновременное исследование макро- и микроструктур в новом «Микроскопе сканирующем электронном РЭМ-10», изготовление которого начато на производстве АО «Завод ПРОТОН» (г. Зеленоград). Микроскоп РЭМ-10 сочетает в себе электронную микроскопию с увеличениями от 10 крат до 100 тысяч крат со сканирующей зондовой микроскопией с увеличениями от 10 тысяч крат до 10 миллионов крат.

Список литературы

1. Дынин Н.В., Иванова А.О., Хасиков Д.В., Оглодков М.С. Селективное лазерное сплавление алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. №8 (56). С. 12-23.

2. Караваев А.К., Пучков Ю.А. Исследование структуры и свойств сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления // Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. серия машиностроение. 2020. №5(134). С. 71-85.

3. Изотермическое деформирование металлов. / С.З. Фиглин, В.В.Бойцов, Ю.Г. Калпин и [др.]. М.; Машиностроение, 1978. 239 с.

4. Нестеров В.С., Еманов Л.Ф., Кропинов В.Е., Шичков И.Ю. Точная объемная изотермическая штамповка алюминиевых и магниевых сплавов. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 1989. № 5. С. 17-19.

5. Zhang Y, Shan D., Xu F. Flow lines control of disk structure with complex shape in isothermal precision forging. // J. Mater. Process. Technol, 2009. 209. P. 745-753.

6. Петров А.Н., Бессонова Н.А., Петров П.А., Басюк Т.С., Кочуров В.О. Исследование технологических свойств алюминиевого сплава RS300 (AK10ч) // Технологическое обеспечение машиностроительных производств. Сборник статей Международной научно-технической конференции. Могилев, 2024. С. 160-165.

7. Lezhnin N.V., Makarov A.V., Luchko S.N., Loginov B.A., Loginov A.B. The effect of ultrasonic impact-friction treatment on a surface roughness of 09Mn2Si structural steel // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2020, 22 (2). P. 16–29.

8. Логинов Б.А., Логинов П.Б., Логинов В.Б., Логинов А.Б. Зондовая микроскопия: применения и рекомендации по разработке // Наноиндустрия, 2019, Т. 12, № 6(92). С. 352-365.

9. Loginov A.B., Bozhev I.V., Bokova-Sirosh S.N., Obratsova E.D., Ismagilov R.R., Loginov B.A., Obratsov A.N. Few-layer graphene formation by carbon deposition on polycrystalline ni surface // Applied Surface Science, 2019, 494. P. 1030-1035.

10. Loginov A.B., Ismagilov R.R., Bokova-Sirosh S.N., Bozhev I.V., Obratsova E.D., Loginov B.A., Obratsov A.N. Formation of nanostructured films based on mos2, ws2, moo2 and their heterostructures // Technical Physics, 2022, 92(13). P. 2078.

11. Loginov A.B., Bozhev I.V., Bokova-Sirosh S.N., Ismagilov R.R., Loginov B.A., Obratsov A.N. Formation of graphene on polycrystalline nickel // Technical Physics, 2019. 64(11). P. 1666-1672.

12. Loginov A.B., Kuvatov M.M., Ismagilov R.R., Sapkov I.V., Fedotov P.V., Kleshch V.I. Obratsova E.D., Obratsov A.N. Evolution of transition metal dichalcogenides films properties during chemical vapor deposition: from monolayer islands to nanowalls // Nanotechnology, 2024. 35. P. 415601.

Петров Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, alexander_petr@mail.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Бессонова Наталья Александровна, аспирант, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Басюк Тимофей Семарович, канд. техн. наук, доцент, Россия, Москва, ООО «НПП Автотехнология-МАМИ»,

Логинов Борис Альбертович, начальник лаборатории, b-loginov@mail.ru, Россия, Зеленоград, АО «Завод ПРОТОН»

SCANNING PROBE MICROSCOPY TECHNIQUE FOR STUDYING THE
MICROSTRUCTURE OF AlSi10Mg (RS300) ALLOY AFTER HOT ISOTHERMAL
DEFORMATION

A.N. Petrov, N.A. Bessonova, P.A. Petrov, T.S. Basuk, B.A. Loginov

The article is devoted to testing the methodology for studying the microstructure of aluminum alloy RS-300 after deformation under isothermal conditions. The macrostructure was studied using an optical microscope; the microstructure - with an electron microscope. Granulometric analysis and surface roughness study were performed using scanning probe microscopy. A methodology for studying the RS-300 alloy on a scanning probe microscope SMM-2000 was developed. The methodology includes the technology of producing polished sections and the technology of determining the grain size and surface roughness. Optimum modes of chemical etching (time and concentration of the chemical solution) of RS-300 alloy samples were determined. Microstructure frames were obtained, and the grain size and surface roughness were determined.

Key words: aluminum alloy RS-300, AlSi10Mg, hot isothermal stamping, additive manufacturing, microstructure, electron microscopy.

Petrov Aleksander Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, alexander_petr@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Bessonova Natalya Aleksandrovich, postgraduate, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Petrov Pavel Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Basyuk Timofey Semarovich, candidate of technical sciences, Russia, Moscow, LLC "NPP Avtotekhnologiya-MAMI",

Loginov Boris Albertovich, head of laboratory, b-loginov@mail.ru, Russia, Zelenograd, JCS PROTON Plant

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

УДК 625.75

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-312-313

ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ВЫРЕЗКИ БАЛЛАСТА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ФУНКЦИИ КАЧЕСТВА

А.А. Шубин, Н.А. Витчук, В.Н. Ефименко, В.Ю. Анцев

Рассмотрена проблема загрязнения балластной призмы железнодорожного пути. Проведен анализ существующих способов устранения выплесков балластной призмы. Обоснована актуальность применения специальных машин для локальной вырезки балластной призмы на небольших участках железнодорожного пути. Проведен анализ существующих конструкций отечественной и зарубежной машин для локальной вырезки балластной призмы. Обоснована актуальность разработки новой отечественной специализированной машины для локальной вырезки балластной призмы. Выполнено обоснование характеристик такой машины на основе структурирования функции качества.

Ключевые слова: балластная призма, дефект, железнодорожный путь, локальный выплеск, путевая машина, структурирование функции качества.

В процессе длительной эксплуатации железнодорожного пути балластная призма постоянно засоряется сыпучими грузами с проходящих поездов, фракциями грунта, попадающими со стороны дефектной площадки земляного полотна, а также мелкими частицами щебня при его разрушении под действием поездной нагрузки. При этом балластная призма теряет свои первоначальные свойства, а остаточные деформации пути увеличиваются, что ведет к повышенному износу элементов верхнего строения пути, подвижного состава и возрастанию расходов железнодорожного транспорта [1].

Локальные выплески балластной призмы (рис. 1) образуются из-за несвоевременной подбивки шпал, скопления под ними дождевой воды. Свидетельством выплеска служит грязь, выплескивающаяся из-под шпал при проходе поезда по месту выплеска.

Чаще всего выплески образуются в местах стыков рельс из-за дополнительного встряхивания состава при их прохождении (в результате происходит стряхивание пыли и грязи с вагонов). Появление выплесков

опасно просадками и перекосами полотна в летний период, а в зимний период в местах выплесков возможно пучение балластной призмы.



Рис. 1. Пример выплеска балластной призмы

При большой загрязненности балласта путь обычно называют «мертвым путем». Загрязненный балласт теряет упругость и дренирующие свойства. При загрязненном балласте вокруг шпал (особенно у их концов) образуются выплески и создаются благоприятные условия для произрастания растительности. При таком состоянии балластной призмы поезда теряют плавность хода, особенно в дождливую погоду; путь, изначально правильно установленный в плане и профиле, быстро расстраивается. Когда балласт приходит в такое состояние, имеется только два способа «оздоровления» пути: очистка балластного слоя или его замена. Балласт, лежащий в пути, имеет большую стоимость, поэтому считается более экономичным очищать балласт, чем производить его замену [1, 2]. Однако не все балласты могут быть очищены. Практика показывает, что целесообразна очистка только щебеночных балластов [2], поскольку щебень твердых пород (граниты, доменные шлаки и пр.) хорошо поддается очистке. При этом не существует единого мнения, насколько целесообразна очистка сильно загрязненного щебня из мягких известняков, поскольку продукты их выветривания обволакивают щебень плотной коркой, которую практически нельзя удалить.

Устранение выплесков происходит путем вырезки балласта в месте выплеска на глубину не менее 300 мм. При этом наилучшим вариантом устранения выплеска является полная вырезка балласта, что приводит к уменьшению вероятности появления повторных локальных выплесков [1, 2].

Для устранения выплесков на протяженных участках в настоящее время существует три основных способа:

– ручную или с помощью средств малой механизации, например, моторногидравлической установки для удаления балласта из шпальных ящиков [3];

– с применением вакуумных уборочных машин типа FATRA-17000;
– с использованием машин глубокой очистки балласта (СЧ-600, СЧ-601, RM 80, ЩОМ-1400, 1600 и др.).

Проведем сравнительный анализ существующих способов удаления выплесков.

Главным недостатком ликвидации выплеска вручную является большая трудоемкость процесса и малая глубина вырезки балласта – 100...200 мм от подошвы шпалы. В результате в месте ликвидации выплеска наблюдается его многократного повторное образование, что подтверждается данными Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой (ЕК АСУИ).

Ремонтная схема и периодичность проведения вырезки выплесков вручную на одной локации представлена на рис. 2, а. Межремонтный период принят равным 700 млн т груза брутто или 20 лет. Зеленый цвет и звездочки указывают, что в эти годы дважды, весной и осенью, проводится вырезка выплеска вручную с частичной заменой элементов верхнего строения пути.

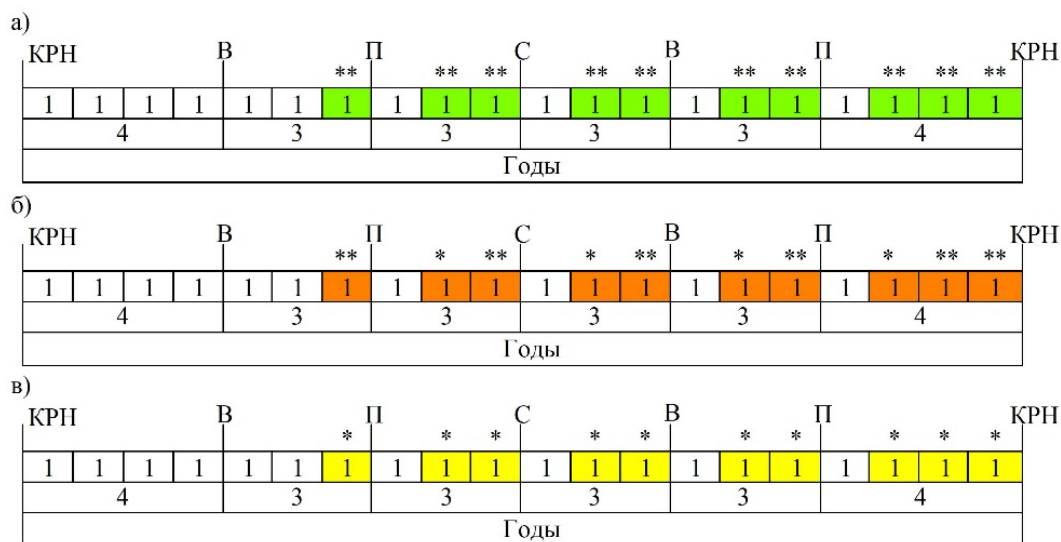


Рис. 2. Ремонтные схемы и периодичность ликвидации выплесков:
а – вручную; б – вакуумной машиной; в – щебнеочистительной машиной; КРН – капитальный ремонт; С – средний ремонт; П – подъемочный ремонт; В – выправочный ремонт; * – выплеск за год проявился один раз; ** – повторение выплеска

Вакуумные уборочные машины применяют на выплесках небольшой протяженности в пределах стрелочных переводов или искусственных сооружений. Использование подобных машин значительно снижает трудоемкость работ, но при этом не устраняет главный недостаток – продолжительное время вырезки, а именно необходимость предоставления длительных «окон» при небольших объемах работ. Ремонтная схема представлена на рис. 2, б. Межремонтный период аналогичен предыдущему случаю. Оранжевым цветом помечены годы, когда выплеск устраняется вакуумной

машиной: одна звездочка – раз в год с частичной заменой элементов верхнего строения, две звездочки – дважды в год (весной и осенью) с частичной заменой элементов верхнего строения.

При устранении выплеска щебнеочистительными машинами качество проведенных работ значительно возрастает, так как глубина вырезки балласта в этом случае составляет не менее 400 мм от подошвы шпал. Сокращается количество повторных ликвидаций выплеска за год (звездочки на рис. 2, в).

Следует отметить, что из трех существующих способов устранения выплесков третий на практике применяют недостаточно часто. Это обусловлено тем, что высокопроизводительные щебнеочистительные машины обычно заняты на капитальных и средних ремонтах железнодорожного пути. Если допустить их применение на небольших участках пути, то окажется, что затраты на устранение выплесков в этом случае будут существенно больше, чем при ручном способе. Это обусловлено необходимостью использования одного и того же набора машин и хозяйственных поездов, что и при выполнении глубокой очистки балласта на участках большой протяженности, при этом выработка на небольших участках пути будет значительно меньше.

Тем не менее необходимость повышения качества устранения выплесков не должна опираться только на экономические показатели. Состояние железнодорожного пути является основой безопасности движения поездов. Работы такого рода должны считаться приоритетными с точки зрения Стратегии обеспечения гарантированной безопасности и надежности перевозочного процесса в холдинге «РЖД» и Транспортной стратегии Российской Федерации.

Это обуславливает актуальность применения специальных машин для локальной вырезки балластной призмы на небольших участках пути.

Проведем анализ существующих конструкций отечественной и зарубежной машин для локальной вырезки балластной призмы.

Машина вырезки балласта МВБ–150 (Россия) [4].

Недостатки:

- машина спроектирована как самоходная в транспортном режиме; для управления в транспортном режиме разработана двухэтажная кабина, которая не обеспечивает удовлетворительный обзор железнодорожного пути по ходу движения и путевых светофоров;

- обзор рабочей зоны барового и роторного устройств, подъемно-рихтовочного устройства из рабочей кабины неудовлетворительный;

- баровое устройство размещено непосредственно под входом в кабину управления, что небезопасно для персонала, покидающего кабину;

- винтовой конвейер перемещает материал в противоход рабочего движения машины, что создаёт дополнительное сопротивление его работе;

- главный конвейер и конвейер роторного устройства имеют предельные для ленточных конвейеров углы наклона;

- бункер запаса щебня имеет объем, недостаточный для засыпки

всей рабочей зоны;

– отсутствует возможность установить пробивщик шпальных ящиков.

Машина LORAM UC1200 (США) [5].

Недостаток:

– отсутствие пробивщика шпальных ящиков.

Достоинства:

– высокая производительность;

– достаточная глубина вырезки;

– бункер запаса щебня имеет объем, достаточный для засыпки всей рабочей зоны;

– хороший обзор рабочей зоны выгребного устройства, уровня загрузки конвейеров и бункера распределителя из кабины за счет системы видеонаблюдения.

Ожидания потребителей	Технические требования						Рейтинг потребителей					Целевое значение	Степень улучшения	Весомость	Весомость, %
	Важность для потребителя	Производительность	Ширина вырезки	Глубина вырезки	Подготовка машины к работе	Самоходность	1	2	3	4	5				
Легкость в управлении	4	3	0	1	9	3	●			●		5	5	20	12,2
Ремонтопригодность	5	1	1	1	0	9	●	●				5	5	25	15,3
Ширина вырезки не менее 5 м	5	3	9	1	1	0		●		●		5	2,5	12,5	7,6
Глубина вырезки не менее 150 мм	5	3	1	9	1	0	●				●	5	5	25	15,3
Защитные ограждения от падения щебня	3	0	0	0	1	0		●		●		5	2,5	7,5	4,6
Конечные выключатели	4	1	0	0	1	0		●			●	5	5	20	12,2
Автоматизация зарядки/разрядки выгребного устройства	5	1	1	1	9	0			●		●	5	1,5	8,5	5,2
Безотказность работы	5	1	0	1	0	0	●			●		5	5	25	15,3
Контроль за работой оборудования	4	1	0	1	0	3	●				●	5	5	20	12,2
Суммарная оценка		65	60	73	98	69							Σ	163,5	100
Приоритетность, %		17,8	16,4	20,0	26,8	18,9									
Единицы измерения		м ³ /ч	м	мм	сек	-									
Продукция «КЗ РПМ»		150	4	200	600	нет									
Продукция «LORAM»		1200	5,2	400	300	да									
Целевое значение		1200	5,2	400	300	да									

Рис. 3. Обоснование характеристик перспективной машины для локальной вырезки балластной призмы: 0 – связи нет; 1 – слабая связь; 3 – средняя связь; 9 – сильная связь

Проведенный анализ наглядно показывает, что существующая конструкция отечественной машины для устранения локальных выплесков балластной призмы значительно уступает своему зарубежному аналогу. Это обуславливает актуальность разработки новой специализированной машины для локальной вырезки балластной призмы.

Для обоснования характеристик такой машины был применен метод структурирования функции качества [6-8]. В результате были определены ожидания потребителей, их весомость, технические требования, расставлены баллы важности для потребителя, установлены связи между ожиданиями и техническими требованиями. Полученный при этом «дом качества», представлен на рис. 3.

В результате было установлено, что машина для локальной вырезки балластной призмы должна обладать следующими характеристиками:

- глубина вырезки балласта: не менее 200 мм и не более 400 мм от подошвы шпалы;
- ширина вырезки балласта: не менее 4000 мм и не более 5200 мм;
- зарядка вырезающего устройства должна быть автоматизированная и не требующая подготовительных операций;
- машина должна быть самоходной в рабочем и транспортном режимах;
- развиваемое тяговое усилие должно быть достаточным для транспортирования машины к месту проведения работ;
- в комплектации машины должен присутствовать грохот, а также конвейерная система для засоренного и чистого щебня;
- конвейерная система должна обеспечивать выгрузку вырезанного балласта на обочину пути или в состав для засорителей.

Создание нового комплекса для локальной вырезки балластной призмы позволит повысить безопасность движения поездов и снизить затраты на содержание верхнего строения пути. В настоящее время разработана концептуальная модель такой машины и ведется ее конструкторская проработка.

Список литературы

1. Содержание балластной призмы железнодорожного пути / [Е.С. Варызгин, Б.Н. Бондаренков, А.Н. Марготьев, В.Ф. Федулов]; под ред. Е.С. Варызгина. М.: Транспорт, 1978. 142 с.
2. Косенко С.А., Иванова Л.И., Акимов С.С. Устройство железнодорожного пути и организация путевых работ. Новосибирск: СГУПС, 2018. 116 с.
3. Маркин М.А. Решение проблемы устранения локальных выплесков // Путь и путевое хозяйство, 2021. №5. С. 18–20.
4. Машина вырезки балласта МВБ–50. Официальный сайт «RailGallery». [Электронный ресурс]. URL: <https://railgallery.ru/model/1368/> (дата обращения 03.11.2024).

5. Машина LORAM UC1200. Официальный сайт компании Loram [Электронный ресурс]. URL: <https://loram.com/maintenance-of-way/ballast-maintenance/undercutting/uc1200/> (дата обращения 03.11.2024).

6. Пономарев С.В., Мищенко С.В., Белобрагин В.Я. и др. Инструменты и методы менеджмента качества: учеб. пособие. М.: РИА «Стандарты и качество», 2005. 248 с.

7. Анцев В.Ю., Иноземцев А.Н. Всеобщее управление качеством: учеб. пособие. Тула : Изд-во ТулГУ, 2005. – 243 с.

8. Анцев В.Ю., Чернецова Е.А. Структурирование функций качества в процессе проектирования грузоподъемных машин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 217-226.

Шубин Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, ashubin@bmstu.ru, Россия, Калуга, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

Витчук Наталья Андреевна, канд. техн. наук, доцент, vitchuk.natalya@mail.ru, Россия, Калуга, Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,

Ефименко Вадим Николаевич, начальник бюро, vadickefimenko@yandex.ru, Россия, Калуга, ООО «Научно-исследовательский центр СТМ»,

Анцев Виталий Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, заведующего кафедрой, anzev@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SUBSTANTIATION OF THE CHARACTERISTICS OF A PROMISING MACHINE FOR LOCAL BALLAST CUTTING BASED ON THE QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT

A.A. Shubin, N.A. Vitchuk, V.N. Efimenko, V.Yu. Antsev

The problem of contamination of the ballast prism of the railway track is considered. An analysis of the existing methods for eliminating ballast prism splashes has been carried out. The relevance of using special machines for local cutting of the ballast prism on small sections of the railway track is substantiated. The analysis of existing designs of domestic and foreign machines for local cutting of ballast prism is carried out. The relevance of the development of a new domestic specialized machine for local cutting of a ballast prism is substantiated. The characteristics of such a machine are justified based on the quality function deployment.

Key words: ballast prism, defect, railway track, local splash, track machine, quality function deployment.

Shubin Alexander Anatolyevich, candidate of technical sciences, docent, head of chair, ashubin@bmstu.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University,

Vitchuk Natalia Andreevna, candidate of technical science, docent, vitchuk.natalya@mail.ru, Russia, Kaluga, Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky,

Efimenko Vadim Nikolaevich, head of the bureau, vadickefimenko@yandex.ru, Russia, Kaluga, Scientific Research Center STM LLS,

Antsev Vitaliy Yur'yevich, doctor of technical science, professor, manager of department, anzev@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 629.4

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-319-320

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ БОРТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ВОДОРОДА ДЛЯ АВТОНОМНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

А.Н. Шмойлов, Д.Е. Григорьев

Настоящая статья посвящена вопросу создания бортовых генераторов водорода для автономного подвижного состава на железнодорожном транспорте. В работе выделены важнейшие факторы, оказывающие влияние на эффективность процесса получения водорода на борту железнодорожного подвижного состава путем гидролиза алюминия. Спланирован и проведен полный факторный эксперимент с целью создания математической модели устанавливающей взаимосвязи влияния различных факторов на активность реакции получения водорода на борту автономного подвижного состава. В качестве факторов в модели эксперимента приняты следующие величины: температура раствора щелочи, степень концентрации раствора щелочи, площадь контакта алюминиевого порошка. Выходной величиной, или функцией отклика, был принят объем полученного в результате химической реакции водорода. Проанализирована вероятность для нормализованных воздействий внешних факторов математической модели получения водорода. Построен график нормальной вероятности для нормализованных воздействий факторов.

Ключевые слова: автономный подвижной состав железнодорожного транспорта, гидролиз, водород, алюмоэнергетика, трехфакторный эксперимент, нормализованные воздействия факторов.

Одним из перспективных трендов на железнодорожном транспорте современности является разработка систем получения водорода на борту автономного подвижного состава для внедрения альтернативных видов тяги [1].

Автономный подвижной состав на водородной тяге имеет более высокий КПД и обладают «нулевым» выбросом диоксида углерода по сравнению с автономным подвижным составом на дизельной тяге.

Алюмоводородные технологии являются составной частью алюмоэнергетики и относятся к числу процессов с использованием возобновляемых ресурсов [2, 3].

Разработка алюмоводородных технологий позволит внести существенный вклад в решение проблем перехода к водородной энергетике. Развитие промышленности в ведущих странах мира способствует росту пристального внимания к вопросам развития водородной энергетике [4]. Алюмоводородные технологии являются базовыми для водородной энергетике, в том числе и для энергоустановок на топливных элементах. Применение алюмоводородных генераторов на автономном подвижном составе позволит решить проблему безопасности перспективных транспортных средств на железнодорожном транспорте с водородными двигательными установками.

Установлено, что крупные производители подвижного состава ведут разработки по данной тематике. Данная тематика прописана в основных

программах развития данных предприятий. Разработки ведущих предприятий подразделяются на два направления: тягово-энергетические установки на водородном топливе и аккумуляторная тяга, внутри которых возможны гибридные исполнения с дополнительным питанием, как от контактной сети, так и дизель-генераторной установки. В то же время ряд компаний прорабатывают вопросы по применению альтернативного топлива в традиционных двигателях внутреннего сгорания, например биотоплива или природного газа.

Процесс получения водорода, в частности получения его методом гидролиза, представляет собой довольно сложное явление, требующее детального изучения, проведения ряда экспериментов и установления взаимосвязей между различными параметрами, влияющими на процесс взаимодействия водного раствора щелочи NaOH и алюминия.

При использовании полного факторного эксперимента главная цель исследователя заключается в получении линейной математической модели процесса [5].

Создание математической модели физического процесса сводится к процессу определения количества необходимых опытов и подбору оптимальных условий их проведения. В данном процессе важно условиться на выполнении следующих главных условий: минимизация числа опытов при варьировании всех переменных, которые определяют процесс. Необходимо выбрать четкую стратегию, которая позволит принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов. Создание математической модели физического процесса сводится к процессу определения количества необходимых опытов и подбору оптимальных условий их проведения. В данном процессе важно условиться на выполнении следующих главных условий: минимизация числа опытов при варьировании всех переменных, которые определяют процесс. Необходимо выбрать четкую стратегию, которая позволит принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов. Важно отметить, что при этом фиксируется промежуточный отчет при выполнении серии последовательных экспериментов. Данные отчеты полезно использовать при последующем планировании экспериментов. Планирование эксперимента позволяет варьировать ряд факторов и получить в итоге количественные оценки всех проявляющихся эффектов. В процессе проведения подобных экспериментов не совсем в полной мере получается минимизировать корреляции между коэффициентами уравнения регрессии [6].

Установлено, что при статистическом подходе математическая модель объекта или процесса представляется в общем виде полиномом n -степени, т.е. отрезком ряда Тейлора, в который разлагается неизвестная функция.

Выбор соответствующего плана эксперимента позволяет обеспечить математической модели разные свойства. Наиболее распространенными являются следующие критерии оптимальности планов эксперимента. План, у которого дисперсионная матрица диагональна, называется ортогональным

(иными словами, удовлетворяет критерию ортогональности). В этом случае полученные оценки коэффициентов регрессии независимы (не смешаны) и имеют одинаковые дисперсии. План, при котором дисперсия выходного параметра Y зависит только от расстояния от центра плана, называется рототабельным. В этом случае точность предсказания значений Y одинакова на равных расстояниях от центра эксперимента и не зависит от направления. План, при котором дисперсионная матрица имеет минимальный след (минимальную сумму диагональных элементов), называется А-оптимальным. В этом случае достигается минимальная средняя дисперсия оценок коэффициентов. План, при котором достигается минимальное значение определителя дисперсионной матрицы, называется D-оптимальным. В этом случае достигается минимум обобщённой дисперсии коэффициентов. План, при котором достигается минимум максимального собственного значения дисперсионной матрицы, называется E-оптимальным. План, при котором достигается минимальная величина максимальной дисперсии выходного параметра Y , называется G-оптимальным.

Классический план состоит из восьми обработок, полученных путем рассмотрения всех комбинаций из трех факторов при двух уровнях каждого. Основная схема эксперимента, имеет для удобства понимания стандартный порядок строк. В каждой строке таблицы представлен один набор экспериментальных условий, в которых отклик получает определенное значение. Три фактора обозначены как A , B , C . Для каждого фактора уровень «-1» является «нижней» установкой или одним из двух уровней, если фактор категориальный. Уровень «+1» является «верхней» установкой или вторым из двух уровней, если фактор категориальный. Столбец, озаглавленный «у» заполняют полученными в эксперименте значениями отклика. Эксперимент должен быть проведен восемь раз при четком соблюдении заданных условий. Эксперимент проводится со случайным порядком следования экспериментальным условиям. Не следует использовать стандартный порядок следования этим условиям (например, возрастающий тренд значений отклика «у» может быть рассмотрен как влияние на отклик фактора C). Последний столбец таблицы содержит сокращенные имена для обозначения восьми обработок функции отклика. Данный столбец описывает обработки с помощью знаков «+» или «-», при этом уровни факторов заданы в соответствии с порядком следования факторов A, B, C . По представленной выше методике установления влияния различных факторов на активность реакции получения водорода на борту автономного подвижного состава был спланирован и рассчитан полный факторный эксперимент для трех факторов.

В качестве факторов в модели приняты следующие величины: температура раствора щелочи A_{NaOH} , °C; степень концентрации раствора щелочи B_{NaOH} , %; площадь контакта алюминиевого порошка C_{Al} , м². Выходными величинами, или функцией отклика, явился объем полученного в результате химической реакции водорода V_H , л.

В табл. 1 представлена матрица планирования полного факторного эксперимента для трех факторов.

Таблица 1

Полный факторный эксперимент для трех факторов

Номер опыта	Факторы			Функция отклика
	A_{NaOH}	B_{NaOH}	C_{Al}	V_H , л
	x_1	x_2	x_3	y_i
1	+1	-1	-1	3,821
2	-1	+1	-1	2,755
3	-1	-1	-1	4,342
4	+1	-1	-1	6,529
5	+1	+1	+1	5,584
6	-1	+1	+1	7,835
7	+1	-1	+1	6,558
8	-1	+1	+1	7,652

Коэффициенты уравнения регрессии b_j определяется скалярным произведением столбца y на соответствующий столбец x_j , отнесенным к числу опытов в матрице планирования n . Учитывая свойства матрицы планирования эксперимента расчет коэффициентов уравнения регрессии можно произвести по следующей формуле:

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ji} Y_i \quad (1)$$

где i – номер опыта; j – номер фактора; n – число опытов.

При переходе фактора с нулевого уровня на верхний или нижний величина коэффициента соответствует вкладу данного фактора в величину параметра оптимизации.

В качестве уравнения регрессии для исследования влияния различных факторов на объем выделившегося при гидролизе водорода принята модель вида:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (2)$$

Значения коэффициентов регрессии b_0, b_1, b_2, b_3 для нормированного параметра объема полученного водорода приведены в табл. 2.

Значимость коэффициентов уравнения регрессии проверяется с помощью критерия Стьюдента, путем расчета дисперсии коэффициента регрессии:

$$s_b^2 = \frac{s_y^2}{n} \quad (3)$$

где s_b^2 – дисперсия коэффициента регрессии; s_y^2 – дисперсия функции отклика.

Коэффициент регрессии значим, если выполнено условие:

$$|b| \geq s_b^2 \cdot t, \quad (4)$$

где t – значение критерия Стьюдента.

В противном случае коэффициент регрессии незначим, и соответствующий член можно исключить из уравнения (табл. 2).

Полученное уравнение регрессии, следует проверить на адекватность. Эту проверку осуществляют с помощью критерия Фишера, который представляет собой отношение дисперсии адекватности s_{ad}^2 к дисперсии воспроизводимости $s_{воспр}^2$.

Уравнение регрессии считается адекватным, если выполняется условие: $F_p \leq F$, где F – табличное значение критерия Фишера.

При сравнении расчетного значения критерия Фишера с его табличным значением, при степенях свободы f_1 и f_2 и доверительной вероятности $P=0,95$ было выявлено, что значение объема полученного в результате химической реакции водорода может быть описано зависимостью, представленной в следующем выражении:

$$V_H = 3,234 + 0,491 A_{NaOH} + 0,628 B_{NaOH} + 0,358 C_{Al} \quad (4)$$

На рисунке представлен график нормальной вероятности для нормализованных воздействий факторов.

Таблица 2

Коэффициенты регрессии для оценки количества полученного в результате химической реакции водорода

Коэффициенты регрессии	
Коэффициенты регрессии	Значения коэффициентов регрессии для параметра, V_H
b_0	3,234
b_1	0,491
b_2	0,628
b_3	0,358
Значимость коэффициентов регрессии	
Коэффициенты регрессии	Значения коэффициентов регрессии для параметра, V_H
b_0	значим
b_1	значим
b_2	значим
b_3	значим

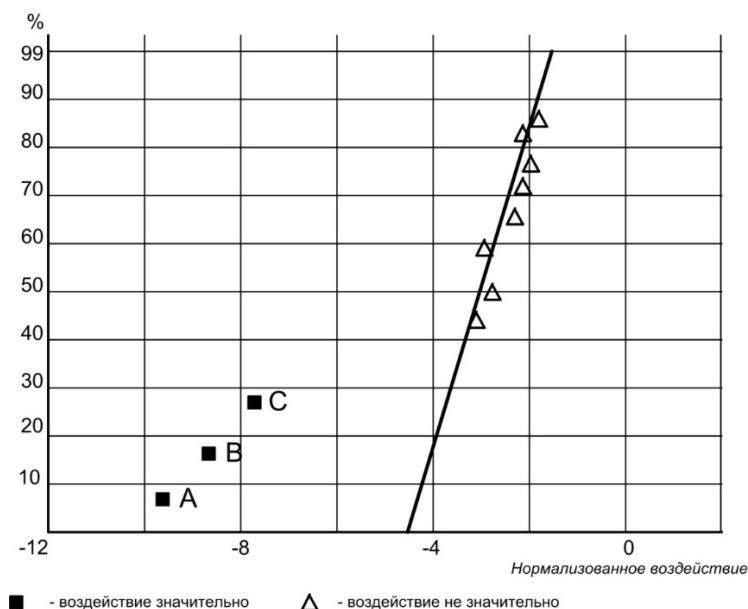


График нормальной вероятности для нормализованных воздействий факторов

Данный график указывает на значимые факторы. Это соответствует тому, что факторы A, B, C и их взаимодействие оказывают значительное воздействие на появление изъязвлений. На графике показан нормализованный

эффект. Это означает, что реальный эффект нормализован в статистическом смысле

Полученная взаимосвязь может быть использована при разработке бортовых устройств получения водорода (генератора водорода) для автономного тягового подвижного состава и проработке дальнейших методов и рекомендации по интенсификации процесса получения водорода путем гидролиза алюминия.

Важно отметить, что применение подобных генераторов водорода для силовых установок на автономном подвижном составе железнодорожного транспорта позволит в итоге поднять КПД данной силовой установки на 40% – 50% и позволит, не менее чем на 30% снизить шум и вибрации от работы силовой установки.

Список литературы

1. Пономарев-Степной Н.Н. Атомно-водородная энергетика / Н.Н. Пономарев-Степной // Росэнергоатом. 2004, № 4.
2. Ляшко А.П. и др. Особенности реакции ультрадисперсного алюминия с водой в режиме горения // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 2. С. 60-65.
3. Варшавский И.Л. Энергоаккумулирующие вещества и их использование. К.: Наукова думка, 1980.
4. Химическая энциклопедия/ Под ред. И.Л. Кнунянца. Т. 1, 2. М.: Советская энциклопедия, 1990.
5. Математическая теория планирования эксперимента: метод. указания к выполнению лабораторных работ / сост. Л. Г. Астахова. Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2014. 77 с.
6. Ахназарова С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. М. Высш.шк., 1978. 213 с.

Шмойлов Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Shmoilov@inbox.ru, Россия, Самара, Приволжский государственный университет путей сообщения,

Григорьев Денис Евгеньевич, сотрудник, den_grigorev_2002@bk.ru, Россия, Самара, Приволжский государственный университет путей сообщения

ON THE ISSUE OF CREATING ON-BOARD HYDROGEN GENERATORS FOR AUTONOMOUS ROLLING STOCK IN RAILWAY TRANSPORT

A.N. Shmoilov, D.E. Grigoriev

This article is devoted to the issue of creating on-board hydrogen generators for autonomous rolling stock in railway transport. The paper highlights the most important factors influencing the efficiency of the hydrogen production process on board railway rolling stock by hydrolysis of aluminum. A complete factorial experiment was planned and conducted in order to create a mathematical model that establishes the relationship between the influence of various factors on the activity of the hydrogen production reaction on board an autonomous rolling stock. The following values were taken as factors in the experimental model: the temperature

of the alkali solution, the degree of concentration of the alkali solution, and the contact area of the aluminum powder. The output value, or response function, was assumed to be the volume of hydrogen produced as a result of a chemical reaction. The probability of a mathematical model of hydrogen production for normalized effects of external factors is analyzed. A graph of the normal probability for the normal is constructed.

Key words: autonomous rolling stock of railway transport, hydrolysis, hydrogen, aluminum power engineering, three-factor experiment, normalized effects of factors.

Shmoilov Andrey Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, Shmoilov@inbox.ru, Russia, Samara, Volga State Transport University,

Grigoriev Denis Evgenievich, employee, den_grigorev_2002@bk.ru, Russia, Samara, Volga State Transport University

УДК 621.878

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-325-326

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МАКСИМУМА ТЯГОВОЙ МОЩНОСТИ КОЛЕСНОЙ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ

В.А. Жулай, В.Л. Тюнин, А.Н. Щиенко

Рассмотрен вопрос аналитического определения положения максимума тяговой мощности колесной землеройно-транспортной машины. Положение максимума тяговой мощности (значение силы тяги колесного движителя соответствующее максимуму тяговой мощности) желательно знать на самом начальном этапе проектирования колесных землеройно-транспортных машин для выбора параметров рабочего органа. Для общности получаемых результатов исследования проводились с помощью безразмерной тяговой характеристики, представляющей собой графические зависимости от относительной силы тяги следующих скалярных относительных величин: коэффициента буксования, относительной теоретической скорости колесного движителя и относительной тяговой мощности. От этих безразмерных параметров легко перейти к реальным, зная сцепной вес и скорость колесного движителя на холостом ходу для конкретной машины. Установлено, что на положение максимума тяговой мощности на оси относительной силы тяги значимое влияние оказывают как величины параметров кривой буксования колесного движителя, так и углового коэффициента графика относительной теоретической скорости колесного движителя (жесткости выходной характеристики моторно-трансмиссионной установки). Разработанная методика аналитического определения положения максимума тяговой мощности колесной землеройно-транспортной машины позволяет определять значение силы тяги колесного движителя, соответствующее максимуму тяговой мощности без предварительного построения тяговой характеристики этой машины.

Ключевые слова: колесный движитель, тяговая характеристика.

Величина тяговой мощности колесных землеройно-транспортных машин (ЗТМ) непосредственно связана с их производительностью на самых энергоемких операциях копания и перемещения грунта через коэффициент

удельного сопротивления грунта копанию [1]. Поэтому тяговая характеристика ЗТМ является основой для расчета их основных технико-экономических показателей, а режим максимальной тяговой мощности будет определять режим работы машины с максимальной производительностью.

Тяговая характеристика ЗТМ формируется путем преобразования выходной характеристики моторно-трансмиссионной установки (МТУ) колесным движителем машины. От соотношения параметров характеристик МТУ и движителя будут зависеть параметры тяговой характеристики машины, в том числе положение и величина максимальной тяговой мощности $N_{T_{max}}$.

Определить величину и значение силы тяги колесного движителя соответствующее максимуму тяговой мощности можно только после построения тяговой характеристики конкретной машины с определенными характеристиками двигателя, трансмиссии и колесного движителя. А под значение силы тяги колесного движителя соответствующее максимуму тяговой мощности выбираются параметры рабочего органа. Поэтому положение максимума тяговой мощности (значение силы тяги колесного движителя соответствующее максимуму тяговой мощности $\psi_{N_{T_{max}}}$) желательно знать на самом начальном этапе проектирования колесных землеройно-транспортных машин.

Исследование влияния параметров колесного движителя на тяговую характеристику достаточно подробно рассмотрено в работах Н.А. Ульянова и его учеников [1-4]. Ими же рассмотрено и согласование параметров двигателя и движителя.

Но исследований по аналитическому определению положения максимума тяговой мощности колесной землеройно-транспортной машины до настоящего времени не проводилось.

Тяговая мощность равна произведению усилия на рабочем органе T на действительную скорость движения машины V_d , т.е. $N_T = TV_d$. Скорость движения машины V_d , в свою очередь, определяется теоретической скоростью колесного движителя V_T и величиной коэффициента буксования δ по зависимости $V_d = V_T(1 - \delta)$.

Величины V_T и δ функционально зависят от силы тяги T , т.е. $V_T = f(T)$ и $\delta = f(T)$. Зависимость $\delta = f(T)$ является монотонно возрастающей и прямолинейной до величины $\delta = 0,1 \dots 0,2$ с последующим интенсивным возрастанием [1]. Вид зависимости $V_T = f(T)$ определяется типом трансмиссии и двигателя (параметрами моторно-трансмиссионной установки). Для механической трансмиссии при работе дизельного двигателя в пределах регуляторной ветви его скоростной характеристики и гидромеханического привода эта функция может быть аппроксимирована прямо пропорциональной зависимостью [2, 3, 5-8].

Для общности получаемых результатов исследования лучше проводить с помощью безразмерной тяговой характеристики [1, 2]. Она

представляет собой графические зависимости от относительной силы тяги $\psi = \frac{T}{G_{сц}}$ следующих безразмерных (скалярных относительных величин) [1,

2, 9]: коэффициента буксования δ , относительной теоретической скорости колесного движителя $V_T^b = \frac{V_T}{V_{T_x}}$, относительной тяговой мощности

$N_T^b = V_T^b(1-\delta)\psi$, где $G_{сц}$ – сцепной вес машины, V_{T_x} – теоретическая скорость движителя на холостом ходу (при $T = 0$). От этих безразмерных параметров легко перейти к реальным зная сцепной вес и скорость колесного движителя на холостом ходу конкретной машины.

Относительная теоретическая скорость колесного движителя V_T^b и коэффициент буксования δ аппроксимируются следующими зависимостями в функции относительной силы тяги ψ [1, 3, 5, 6]

$$V_T^b = (1 - k\psi); \delta = A\psi + B\psi^n,$$

где k – угловой коэффициент; A, B, n – коэффициенты аппроксимирующего выражения, зависящие от параметров колесного движителя и опорной поверхности.

Тогда относительная тяговая мощность будет равна

$$N_T^b = (1 - k\psi)(1 - A\psi - B\psi^n)\psi.$$

Рассмотрим влияние величин параметров моторно-трансмиссионной установки, колесного движителя и опорной поверхности на положение максимума тяговой мощности на оси относительной силы тяги.

Величина углового коэффициента графика относительной теоретической скорости колесного движителя k изменяется от 0,05 до 1 в зависимости от модели двигателя и типа трансмиссии [2, 3, 5-8]. Значения коэффициентов аппроксимирующей кривую буксования функции для различных типов грунтов и параметров колесного движителя с пневматической шиной равны: $A = 0,1 \dots 0,15$; $B = 2 \dots 25$; $n = 4 \dots 8$ [1].

Графики безразмерных тяговых характеристик с различными значениями параметров моторно-трансмиссионной установки, колесного движителя и опорной поверхности представлены на рисунках 1 и 2.

Из анализа представленных графических зависимостей видно, что значимое влияние на положение максимума тяговой мощности на оси относительной силы тяги оказывают как величины параметров кривой буксования колесного движителя (для данных (1) на рис. 1 имеют значения $\psi_{N_{T_{max1}}} = 0,457$ и $\psi_{N_{T_{max2}}} = 0,324$, т.е. отличаются на 41%), так и углового коэффициента k , изменение его величины от 0,1 (механическая трансмиссия) до 1 (гидромеханическая трансмиссия), приводит к изменению $\psi_{N_{T_{max}}}$ на 36 % (с 0,638 до 0,468).

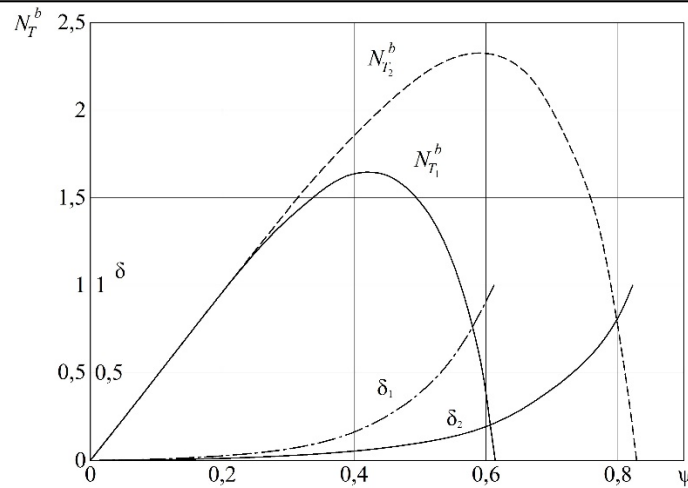


Рис. 1. Безразмерная тяговая характеристика с параметрами моторно-трансмиссионной установки, колесного движителя и опорной поверхности: 1 – $k = 0,05$; $A = 0,1$; $B = 2,8$; $n = 6$; 2 – $k = 0,05$; $A = 0,15$; $B = 10$; $n = 5$.

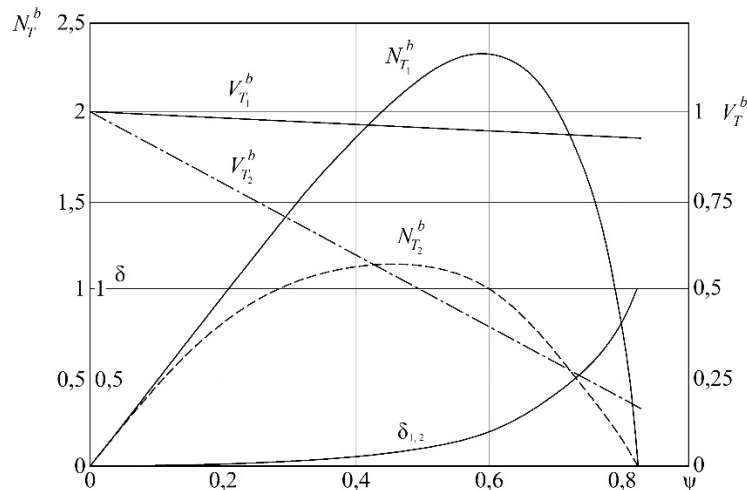


Рис. 2. Безразмерная тяговая характеристика с параметрами моторно-трансмиссионной установки, колесного движителя и опорной поверхности: 1 – $k = 0,1$; $A = 0,1$; $B = 2,8$; $n = 6$; 2 – $k = 1$; $A = 0,1$; $B = 2,8$; $n = 6$.

Таким образом, аналитическое нахождение положения максимума тяговой мощности (значения силы тяги колесного движителя соответствующее максимуму тяговой мощности $\psi_{N_{T_{max}}}$) является актуальной задачей.

Для аналитического нахождения экстремума функции надо определить ее первую производную и приравнять ее к нулю. Если при прохождении через ноль знак производной меняется с плюса на минус, то эта точка будет максимумом, а если с минуса на плюс, то минимумом [10, 11].

Следовательно, для нахождения положения максимума относительной тяговой мощности необходимо найти первую производную функции $N_T^b = f(\psi)$ и исследовать ее на изменение знака при прохождении через ноль.

В соответствии с правилами дифференцирования первая производная функции относительной тяговой мощности равна

$$N_T^{b'} = (k\psi - 1)(B\psi^n + A\psi - 1) + k\psi(B\psi^n + A\psi - 1) + \psi(nB\psi^{n-1} + A)(k\psi - 1).$$

Для нахождения значения $\psi_{N_{T_{max}}}$ приравняем $N_T^{b'}$ нулю.

$$(k\psi - 1)(B\psi^n + A\psi - 1) + k\psi(B\psi^n + A\psi - 1) + \psi(nB\psi^{n-1} + A)(k\psi - 1) = 0.$$

Решение полученного нелинейного уравнения с одним неизвестным наиболее просто реализуется в численном виде в системе MathCAD.

Численное нахождение корней уравнения вида $f(\psi) = 0$ производится с помощью встроенной функции *root* [11]. Для этого необходимо построить график полученной функции для определения ее монотонности (отсутствии нескольких максимумов или минимумов) на исследуемом диапазоне изменения аргумента.

В нашем случае диапазон изменения относительной силы тяги ψ будет от 0 до 0,8.

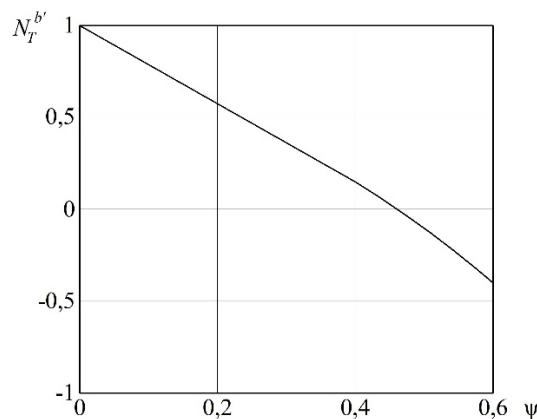


Рис. 3. График функции $N_T^{b'} = f(\psi)$

Из анализа графика функции $N_T^{b'} = f(\psi)$ видно, что в диапазоне значений относительной силы тяги ψ от 0 до 0,8 она не имеет экстремумов, и переход ее значения через ноль знак меняется с плюса на минус, то есть эта точка будет максимумом.

Выводы:

1. Разработанная методика аналитического определения положения максимума тяговой мощности колесной землеройно-транспортной машины позволяет определять значение силы тяги колесного движителя, соответствующее максимуму тяговой мощности без предварительного построения тяговой характеристики этой машины.

2. На положение максимума тяговой мощности на оси относительной силы тяги значимое влияние оказывают как величины параметров кривой буксования колесного движителя, так и углового коэффициента графика относительной теоретической скорости колесного движителя (жесткости выходной характеристики моторно-трансмиссионной установки).

Список литературы

1. Ульянов Н.А. Колесные движители строительных и дорожных машин: Теория и расчет. М.: Машиностроение, 1982. 279 с.
2. Влияние параметров привода на тяговую характеристику землеройно-транспортных машин / Жулай В.А., Тюнин В.Л. // Строительные и дорожные машины. 2018. № 4. С. 35-39.
3. Жулай В.А. Аппроксимация скоростных характеристик дизельных двигателей / В.А. Жулай, В.И. Енин // Строительные и дорожные машины. 2011. № 5. С. 46-48.
4. Жулай В.А. Анализ мощностного баланса землеройно-транспортных машин / В.А. Жулай, В.Л. Тюнин, А.В. Малофеев, А.И. Пошвин // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Серия «Высокие технологии. Экология». 2012. С. 296-299.
5. Багиров Д.Д. Двигатели внутреннего сгорания строительных и дорожных машин / Д.Д. Багиров, А.В. Златопольский. М.: Машиностроение, 1974. 220 с.
6. Дорменев С.И. Тракторные моторно-трансмиссионные установки с двигателями постоянной мощности / С.И. Дорменев [и др.]. М.: Машиностроение, 1987. 184 с.
7. Математическое представление выходной характеристики системы двигатель – гидротрансформатор с отбором мощности / В.А. Жулай [и др.] // Строительные и дорожные машины. 2012. № 6. С. 44-47.
8. Промышленные тракторы / Ю.В. Гинзбург, А.И. Швед, А.П. Парфенов. М.: Машиностроение, 1986. 296 с.
9. Безразмерные величины // Большая Российская энциклопедия – электронная версия [Электронный ресурс] URL: <https://bigenc.ru> (дата обращения: 10.05.2024).
10. Основные математические формулы: Справочник / Под ред. Ю.С. Богданова. Мн.: Выш. шк., 1988. 269 с.
11. Алябьева С.В. MathCAD для студентов: Учебный практикум / С.В. Алябьева, Е.П. Борматова, М.В. Данилова, Е.Е. Семенова: Изд-во ПетрГУ. Петрозаводск, 2007. 154 с.

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

Тюнин Виталий Леонидович, канд. техн. наук, доцент, декан, tuninvl@yandex.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

Щиенко Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, a.n.shienko@mail.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет

ANALYTICAL DETERMINATION OF THE POSITION OF THE MAXIMUM TRACTION
POWER OF THE WHEEL EARTHMOVING AND TRANSPORT VEHICLES

V.A. Zhulai, V.L. Tyunin, A.N. Shchienko

The issue of analytical determination of the position of the maximum traction power of a wheeled earthmoving and transport vehicle is considered. It is desirable to know the position of the maximum traction power (the value of the traction force of the wheel mover corresponding to the maximum traction power) at the very initial stage of designing wheeled earthmoving machines to select the parameters of the working body. For the generality of the obtained results, the research was carried out using a dimensionless traction characteristic, which is a graphical dependence on the relative traction force of the following scalar relative values: the slip coefficient, the relative theoretical speed of the wheeled vehicle and the relative traction power. It is easy to move from these dimensionless parameters to real ones, knowing the coupling weight and the speed of the wheel drive at full speed for a particular machine. It has been established that the position of the maximum traction power on the axis of the relative thrust force is significantly influenced by both the values of the parameters of the rolling curve of the wheel drive and the angular coefficient of the graph of the relative theoretical speed of the wheel drive (stiffness of the output characteristic of the motor transmission unit). The developed method of analytical determination of the position of the maximum traction power of a wheeled earthmoving and transport machine allows determining the value of the traction force of the wheel mover corresponding to the maximum traction power without first constructing the traction characteristics of this machine.

Key words: wheel drive, traction characteristics.

Zhulai Vladimir Alexeyevich, doctor of technical sciences, professor, head of the chair, zhulai@cchgeu.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Tyunin Vitaliy Leonidovich, candidate of technical sciences, docent, dean, tuninvl@yandex.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Shchienko Alexey Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, a.n.shienko@mail.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University

УДК 621.878.62

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-332-333

РАЗГРУЗКА РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРЯМАЯ ЛОПАТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА ПРИ КОПАНИ ГРУНТА

В.А. Нилов, В.А. Жулай, В.Л. Тюнин

Приведена конструкция оригинального устройства для гидравлического экскаватора с оборудованием обратная лопата, обеспечивающая уменьшение нагрузок на его стрелу и поворотную платформу за счет установки «анкера» на время заполнения ковша. Это устройство обеспечивает существенную разгрузку поворотной платформы гидравлического экскаватора строительного класса с оборудованием прямая лопата, кроме того, она обеспечивает существенное увеличение продольной устойчивости экскаватора при разработке забоя. Выносные опоры гидравлического экскаватора обеспечивают существенное уменьшение нагрузок на экскаватор в период разработки грунта и увеличивают его продольную устойчивость, что особенно важно при разработке прочных и мерзлых грунтов. Изучены вопросы определения усилий, действующих на стрелу прямой лопаты гидравлического экскаватора. Установлена возможность уменьшения усилий в гидроцилиндрах рабочего оборудования. Применение выносных опор существенно уменьшает нагрузки на шарнир пяты стрелы, её гидроцилиндры и поворотную платформу экскаватора; выносные опоры улучшают устойчивость экскаватора при разработке забоя; вертикальная нагрузка на выносные опоры соизмерима с весом рабочего оборудования с грунтом. Управление выносными опорами легко автоматизировать, что положительно отразится на снижении утомляемости оператора.

Ключевые слова: гидравлические экскаваторы, снижение нагрузок.

В настоящее время гидравлические экскаваторы практически полностью вытеснили экскаваторы канатные в строительной отрасли и успешно конкурируют с ними при добыче полезных ископаемых открытым способом (карьерные гидравлические экскаваторы [1...5], рис. 1). При работе одноковшового экскаватора наиболее нагруженным элементом конструкции является его рабочее оборудование. Для гидравлического экскаватора с оборудованием обратная лопата предложена конструкция, обеспечивающая уменьшение нагрузок на его стрелу и поворотную платформу за счет установки «анкера» на время заполнения ковша [6, 7], рис. 2.



Рис. 1. Гидравлический карьерный экскаватор

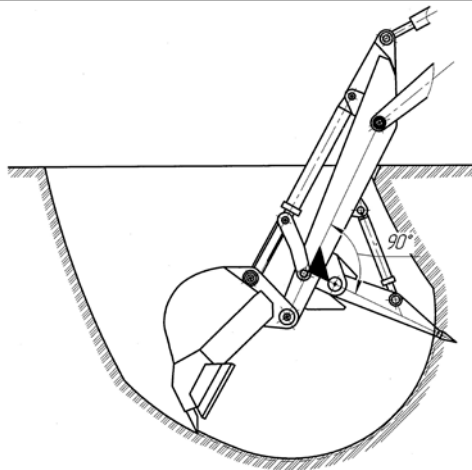


Рис. 2. Разгрузка стрелы обратной лопаты экскаватора

На кафедре Строительной техники и инженерной механики имени профессора Н.А. Ульянова Воронежского государственного технического университета проводится интенсивная работа по совершенствованию рабочего оборудования гидравлических экскаваторов строительного класса. Разработана и запатентована простая прогрессивная конструкция [8] для существенной разгрузки поворотной платформы гидравлического экскаватора строительного класса с оборудованием прямой лопаты, рис. 3. Кроме того, такая конструкция обеспечивает существенное увеличение продольной устойчивости экскаватора при разработке забоя.

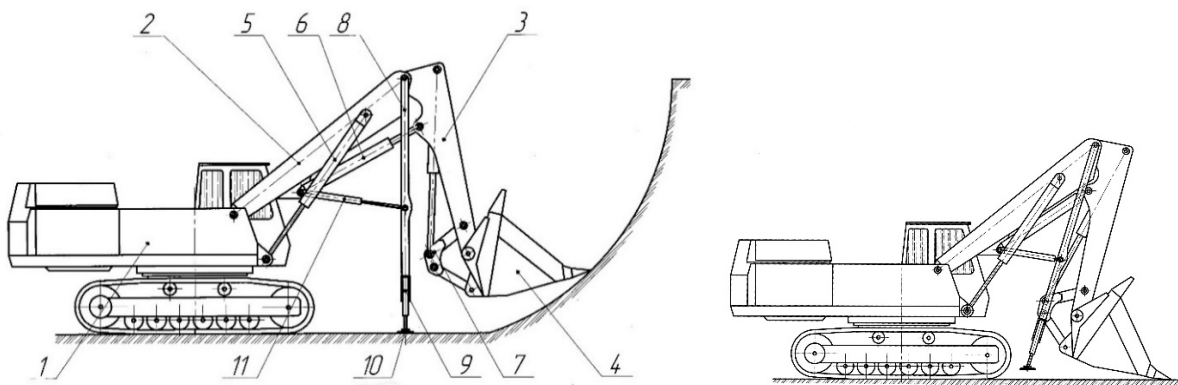


Рис. 3. Устройство для уменьшения нагрузок на поворотную платформу гидравлического экскаватора: а – разработка забоя; б – поворот на выгрузку

Рабочее оборудование прямой лопаты гидравлического экскаватора 1 включает стрелу 2, рукоять 3, ковш 4, гидроцилиндры управления 5 стрелой 2, гидроцилиндр управления 6 рукоятью 3, механизм поворота 7 ковша 4, выносная опора, состоящая из стойки 8 с аутригерами 9, и гидроцилиндры привода 11 стойки 8.

Работа экскаватора происходит следующим образом. При перемещении экскаватора по забою рабочее оборудование с выносной опорой находится в транспортном положении вдоль стрелы 2. Для начала операции

копания грунта оператор экскаватора 1 выдвигает рукоять 3 гидроцилиндром 6 в сторону забоя, гидроцилиндрами привода 11 перемещает выносную опору (стойку 8) в рабочее вертикальное положение (рис. 3а), переводит аутригеры 9 в рабочее положение и запирает гидроцилиндры привода 11 стойки 8. После установки стойки 8 в рабочее вертикальное положение оператор начинает копание грунта рукоятью 3 или ковшом 4.

При копании грунта усилие копания с рабочего органа (ковш 4) передается последовательно на рукоять 3, стрелу 2, затем на выносную опору (стойку 8 и через аутригеры 9) на забой. На сам экскаватор 1 передается существенно уменьшенное усилие от копания грунта, величина которого в значительной степени зависит от жесткости стойки 8 и грунта в забое. Это «остаточное» усилие можно ещё уменьшить, если на время копания грунта и работы стойки 8 перевести гидроцилиндры 5 управления стрелой 2 в плавающее положение.

После завершения заполнения ковша 4 грунтом оператор запирает гидроцилиндры управления 5 стрелой 2, чем фиксирует все рабочее оборудование, втягивает аутригеры 9 и поворачивает стойку 8 гидроцилиндрами привода 11 в положение поворота платформы (рис. 3б). Далее оператор выполняет поворот с груженным ковшом 4 на разгрузку, разгрузку грунта и обратный поворот в забой обычным образом.

Если позволяет конфигурация забоя, то оператор может выполнять эти операции с втянутыми аутригерами 9 и не возвращать стойку 8 в транспортное положение.

Процесс установки и снятия выносной опоры (стойка 8 с аутригерами 9) легко поддается автоматизации, что практически не увеличивает утомляемость оператора и продолжительность цикла экскаватора.

Выносные опоры гидравлического экскаватора обеспечивают существенное уменьшение нагрузок на экскаватор в период разработки грунта и увеличивают его продольную устойчивость, что особенно важно при разработке прочных и мерзлых грунтов.

На рис. 4 и 5 представлены схемы расчета нагрузок на рабочее оборудование прямая лопата гидравлического экскаватора при работе приводом ковша.

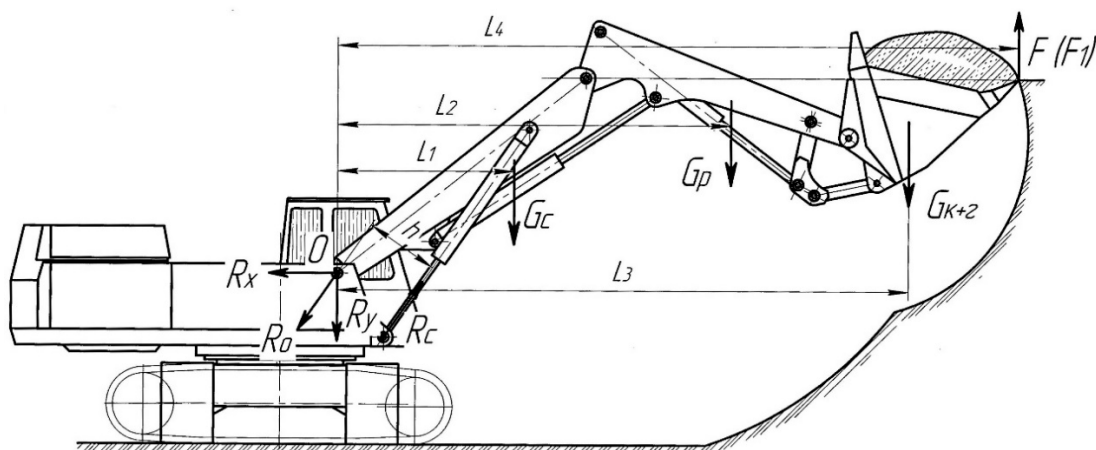


Рис. 4. Схема расчетная для серийного экскаватора

Расчетное положение соответствует завершению процесса копания и началу поворота платформы для разгрузки груженого ковша. Усилие на зубьях ковша F создает механизм поворота ковша, усилие $F1$ – механизм поворота рукояти, и они могут быть реализованы при упоре зубьев ковша в труднопреодолимое препятствие.

Нагрузки, действующие на гидроцилиндры стрелы и пята стрелы серийного гидравлического экскаватора, можно определить по зависимостям:

$$R_c = (1/h)(L_1 \cdot G_c + L_2 \cdot G_p + L_3 \cdot G_{k+T}) \quad (1)$$

$$R_c = (1/h)(L_1 \cdot G_c + L_2 \cdot G_p + L_3 \cdot G_{k+T} + F \cdot L_4) \quad (2)$$

$$R_0 = (1/h)(-L_8 \cdot G_c + L_5 \cdot G_p + L_6 \cdot G_{k+T}) \quad (3)$$

$$R_0 = (1/h)(-L_8 \cdot G_c + L_5 \cdot G_p + L_6 \cdot G_{k+T} + F \cdot L_7) \quad (4)$$

где h , L_1 , L_2 , L_3 , L_4 – плечи соответствующих сил до пята стрелы (рис. 4); L_5 , L_6 , L_7 , L_8 – плечи соответствующих сил до точки крепления гидроцилиндров подъема-опускания стрелы к стреле.

Активные усилия на зубьях ковша F и $F1$ определены для гидроцилиндра диаметром 140 мм при давлении 32 МПа в расчетном положении (рис. 4).

Нагрузки, действующие на пята стрелы и выносные опоры гидравлического экскаватора, с можно определить по зависимостям:

$$R_y = (1/L_5)(-L_1 \cdot G_c + L_2 \cdot G_p + L_3 \cdot G_{k+T} + F \cdot L_4) \quad (5)$$

$$R_{ст} = (1/L_5)[(L_5 - L_1) \cdot G_c + (L_5 + L_2) \cdot G_p + (L_5 + L_3) \cdot G_{k+T}] \quad (6)$$

где L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 – плечи соответствующих сил до оголовка стрелы (рис. 5).

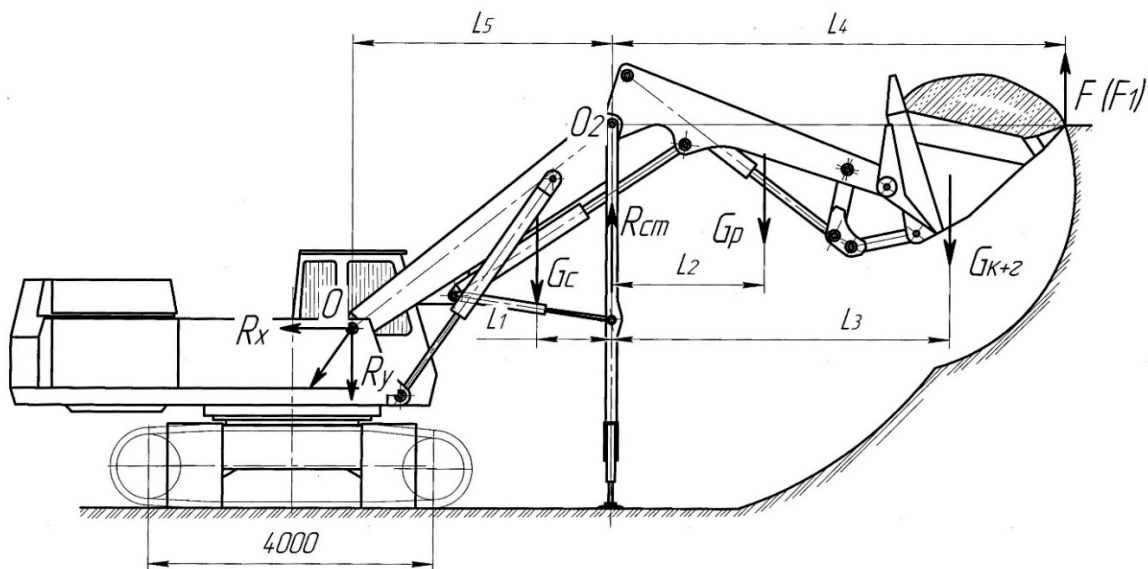


Рис. 5. Схема расчетная для экскаватора с выносными опорами

В таблице даны результаты расчета усилий на гидроцилиндры стрелы (R_c), усилие на шарнир пята стрелы (R_0) и выносные опоры (стойки) ($R_{ст}$) для экскаватора ЭО-5122 при работе как приводом ковша (F), так и приводом рукояти ($F1$). Полученные результаты показывают, что выносные опоры (рис. 3, 5) существенно уменьшают силовое воздействие на

поворотную платформу экскаватора: на шарнир пяты стрелы на 74 %, а на гидроцилиндры стрелы ещё больше, на 100 % (плавающее положение гидроцилиндров).

При этом суммарное усилие (R_{cm}) на новый элемент конструкции – выносные опоры соизмеримо с весом рабочего оборудования с грунтом и существенно меньше, чем нагрузки на шарнир пяты стрелы (на 50 %) и её гидроцилиндры (на 30,2 %) для серийного гидравлического экскаватора.

Полная разгрузка стреловых гидроцилиндров при копании грунта существенно увеличивает их долговечность, а выносные опоры значительно повышают устойчивость экскаватора при разработке особенно прочных и мерзлых грунтов. Установка выносных опор на серийный гидравлический экскаватор также позволяет несколько уменьшить вес его противовеса (опрокидывание назад).

Усилия, действующие на стрелу прямой лопаты гидравлического экскаватора

	Наименование нагрузок	Усилие на зубьях ковша, F, кН			
		привод ковша		привод рукояти	
		F=0	F= 95	F=0	F1=24,6
Серийная конструкция					
1	Усилие на гидроцилиндры стрелы (R_c), кН	417,55	1279,4	417,55	640,0
2	Суммарное усилие на шарнир пяты стрелы (R_o), кН	251,9	871,2	251,9	412,2
Конструкция с выносными опорами					
3	Усилие на гидроцилиндры стрелы (R_c), кН	Гидроцилиндры в плавающем положении			
4	Суммарное усилие на шарнир пяты стрелы (R_o), кН	61,4	227,14	61,4	104,3
5	Усилие на выносные опоры (R_{cm}), кН	126,4	378	126,4	193,8
Уменьшение нагрузок на, %					
6	Гидроцилиндры стрелы (R_{cm})	100			
7	Шарнир пяты стрелы (R_o)	≈ 74			

Выводы:

1. Применение выносных опор *существенно* уменьшает нагрузки на шарнир пяты стрелы, её гидроцилиндры и поворотную платформу экскаватора.

2. Выносные опоры улучшают устойчивость экскаватора при разработке забоя.

3. Вертикальная нагрузка на выносные опоры соизмерима с весом рабочего оборудования с грунтом.

4. Управление выносными опорами легко автоматизировать, что положительно отразится на снижении утомляемости оператора.

Список литературы

1. Опыт применения гидравлических экскаваторов в сложных горно-геологических и климатических условиях / Бураков А.М., Панишев С.В., Алькова Е.Л., Хосоев Д.В. // Горная промышленность. 2022. № 2. С. 90–96.

2. Генералы карьеров – гидравлические экскаваторы на горных предприятиях России / Бураков А.М., Панишев С.В., Алькова Е.Л., Хосоев Д.В. // Промышленник Сибири. 2023, № 2. С. 50–54.

3. Соотношения активных и реактивных нагрузок в механизмах рабочего оборудования гидравлического экскаватора / Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Шестаков В.С., Телиман И. В. // Горное оборудование и Электромеханика. 2018 № 1 (135). С. 7-9.

4. Dynamics of mini hydraulic backhoe excavator: A lagrange-euler (le) approach / Patel B. P., Prajapati J. M. International // Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2014. V. 8. №. 1. P. 195-20.

5. Experimental verification on analytical models of lunar excavation / Xi B. et al. // Journal of Terramechanics. 2019. V. 83. P. 1-13.

6. Пат. 2807273 РФ. Устройство для разгрузки стрелы гидравлического экскаватора / Нилов В.А., Жула В.А., Федоров Е.В., Скукин А.А., Трошин В.А. Оpubл. 13.11.2023, Бюл. № 32.

7. Разгрузка металлоконструкции стрелы гидравлического экскаватора от силового воздействия на забой / Нилов В.А., Жулай В.А., Тюнин В.Л., Федоров Е.В. // Строительные и дорожные машины. 2023. № 11. С. 30–32.

8. Пат. 2829702 РФ. Рабочее оборудование прямая лопата гидравлического экскаватора / В.А. Нилов, В.А. Жулай, Е.В. Федоров, Ныркин В.А. Оpubл. 05.11.2024, Бюл. № 31.

Нилов Владимир Александрович, д-р техн. наук, профессор, vladnil1014@mail.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

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

Тюнин Виталий Леонидович, канд. техн. наук, доцент, декан, tunin@cchgeu.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет

UNLOADING OF WORKING EQUIPMENT STRAIGHT SHOVEL HYDRAULIC EXCAVATOR WHEN DIGGING THE GROUND

V.A. Nilov, V.A. Zhulai, V.L. Tyunin

The design of the original device for a hydraulic excavator with a reverse shovel equipment is presented, which reduces the loads on its boom and rotary platform by installing an "anchor" during bucket filling. This device provides significant unloading of the rotary platform of a construction-class hydraulic excavator with straight shovel equipment, in addition, it provides a significant increase in the longitudinal stability of the excavator during the development of the face. The outriggers of the hydraulic excavator provide a significant reduction in the loads on the excavator during the development of the soil and increase its longitudinal stability, which is especially important when developing durable and frozen soils. The issues of determining the forces acting on the boom of a straight shovel of a hydraulic excavator are studied. The possibility of reducing the forces in the hydraulic cylinders of the working equipment has been established. The use of outriggers significantly reduces the load on the hinge of

the boom heel, its hydraulic cylinders and the rotary platform of the excavator; outriggers improve the stability of the excavator during the development of the face; the vertical load on outriggers is commensurate with the weight of the working equipment with the ground. Outrigger control is easy to automate, which will have a positive effect on reducing operator fatigue.

Key words: hydraulic excavators, load reduction.

Nilov Vladimir Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, vladnil1014@mail.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Zhulai Vladimir Alexeyevich, doctor of technical sciences, professor, head of the chair, zhulai@cchgeu.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Tyunin Vitaliy Leonidovich, candidate of technical sciences, docent, dean, tuninvl@yandex.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University

УДК 629.488.2

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-338-339

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ВЫЯВЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

А.Н. Шмойлов, Н.В. Лазаревич

Статья посвящена вопросу совершенствования процесса технического обслуживания железнодорожного подвижного состава. В работе выделены преимущества применения современных цифровых технологии на железнодорожном транспорте, реализованных в виде переносных электронных устройств с функциями информационных электронных помощников для работников пунктов технического обслуживания. Приведена блок-схема системы для выполнения информационной задачи цифрового персонального помощника. Уточнена комплектация и проведено сравнение различных типов микроконтроллеров для системы приемопередатчика информации цифрового персонального помощника. Рассчитаны показатели безотказности рассматриваемых типов микроконтроллеров цифрового персонального помощника.

Ключевые слова: техническое обслуживание, информационное сопровождение, подвижной состав, цифровой персональный помощник, голосовой запрос информации, блок-схема, микроконтроллер.

Железнодорожный транспорт осуществляет перевозку критически важных грузов, в том числе и стратегического назначения. Данная непрерывная работа важна для обеспечения эффективной и бесперебойной работы главных отраслей промышленности страны.

Стратегией развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 г. (Стратегия – 2030) намечены ключевые задачи, решение которых базируется на идеологии инновационного прорыва. Одним из направлений осуществления этой программы является повышение

эффективности технического обслуживания и выявления неисправностей железнодорожного подвижного состава работниками железнодорожной отрасли в эксплуатационных депо.

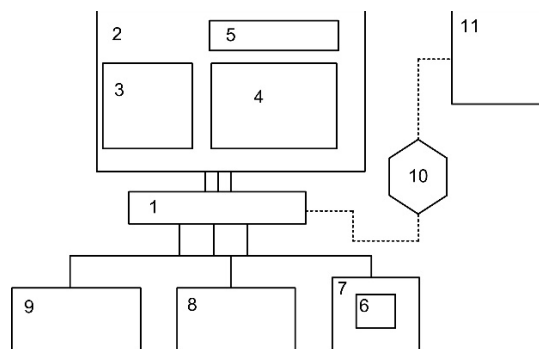
Выявление неисправностей основных узлов железнодорожных вагонов на пунктах технического обслуживания вагонов на ранней стадии является залогом безаварийной эксплуатации данной единицы подвижного состава по сети ОАО «РЖД». Из различных информационных источников и в силу специфики работы пунктов технического обслуживания (ПТО) следует то, что безопасность движения поездов напрямую зависит от уровня профессионализма осмотрщиков-ремонтников и строгое соблюдение ими технологии при осмотре [1].

Современные цифровые технологии дают возможность по технической и практической реализации автоматизированных информационных цифровых помощников для работников ПТО [2]. Подобные цифровые решения позволяют оптимизировать работы, связанные с техническим обслуживанием подвижного состава в эксплуатационных депо.

По мере развития микроэлектроники и цифровых устройств, переносные цифровые устройства для работников все более широко приходят в различные отрасли промышленности. Например, вычислительные устройства все чаще добавляют функции, такие как распознавание речи. Речь может быть эффективным способом общения пользователя с вычислительным устройством, и разрабатываются приложения с речевым управлением, такие как цифровые персональные помощники с речевым управлением.

Цифровой персональный помощник с голосовым управлением предлагается применять в качестве носимого устройства информационной поддержки для осмотрщика-ремонтника в парках путей пунктов технического обслуживания подвижного состава.

Блок-схема системы для выполнения информационной задачи цифрового персонального помощника представлена на рисунке.



Блок-схема системы для выполнения информационной задачи цифрового персонального помощника: 1 – приемопередатчик информации, 2 – цифровой персональный помощник, 3 – модуль обработки языка, 4 – пользовательский интерфейс, 5 – динамик, 6 – блок архивации задач, 7 – приложение с голосовой поддержкой, 8 – структура данных команд, 9 – микрофон, 10 – интрасеть, 11 – удаленный серверный компьютер.

На данном рисунке представлена блок-схема цифрового персонального помощника в варианте реализации информационной помощи работнику ПТО с помощью устройства без монитора и с речевым управлением с голосовым запросом информации. Блок-схема системы для выполнения информационной задачи цифрового персонального помощника состоит из следующих элементов: 1 – приемопередатчик информации, 2 – цифровой персональный помощник, 3 – модуль обработки языка, 4 – пользовательский интерфейс, 5 – динамик, 6 – блок архивации задач, 7 – приложение с голосовой поддержкой; 8 – структура данных команд; 9 – микрофон; 10 – интрасеть; 11 – удаленный серверный компьютер.

Задачи которые могут быть решены посредством цифрового персонального помощника с голосовым запросом информации включают в себя следующие пункты: извлечение необходимой информации из технологических карт по осмотру вагонов или другого подвижного состава; подбор технической документации по конструктивным особенностям подвижного состава различных типов; предоставление информации о допустимых размерах и износах поверхностей катания колесных пар; хранение и извлечение напоминаний по техническому обслуживанию подвижного состава и т.д.

Следует выделить следующую главную особенность данного устройства: постановка запроса на необходимую информацию по техническому обслуживанию подвижного состава осуществляется голосом, т.е. руки работника не заняты и он не отвлекается от технологических операций осмотра. Конструктивное исполнение данного устройства реализовано по блочному принципу с модулями программного обеспечения собственной разработки, которые установлены в вычислительное устройство. Алгоритм работы устройства содержит набор команд для идентификации и запуска отдельных приложений устройства в зависимости от поставленной информационной задачи. Речевой запрос необходимой информации работника транспортного комплекса преобразуется посредством микрофона 9 в электрический сигнал и поступает через приемопередатчик информации 1 в модуль обработки языка 3 данного устройства.

Модуль 3 обработки языка генерирует поток информации и формирует ответ работнику транспортного комплекса через динамик 5 устройства.

Цикл работы приложения устройства имеет следующие рабочие стадии: «начальное» состояние, переход в состояние «ход выполнения», в это время информационная задача выполняется, переход в «итоговое» состояние, когда задача завершена.

Отчет о ходе выполнения информационной задачи цифрового персонального помощника 2 имеет представляется через интерфейс 4 пользователя. Информация может предоставляться различными способами: в виде текстового сообщения на дисплее устройства, звуковых сообщений через динамик [3].

Цифровой персональный помощник имеет связь с внутренней сетью предприятия и может осуществлять передачу отчетов о ходе технического обслуживания дистанционно в режиме реального времени.

На основе представленной блок-схемы были проработаны конструктивные особенности опытного образца цифрового помощника.

С целью подбора оптимального типа микроконтроллеров приемопередатчика информации для системы управления цифрового персонального помощника были проанализированы технические характеристики различных типов данных устройств и рассчитаны показатели безотказности рассматриваемых типов микроконтроллеров.

В табл. 1 представлены основные технические характеристики для проведения сравнительного анализа различных типов микроконтроллеров приемопередатчика информации.

Таблица 1

Технические характеристики для сравнительного анализа микроконтроллеров

Наименование	Тип архитектуры	Память SRAM	Устойчивость к внешним воздействиям	Диапазон рабочих температур, °C
RP2040	Cortex M0	264kB	Вибропрочное группа №2 по ГОСТ Р 52931-2008	-0...+40 °C
MCS 51	CISC	264kB	Вибропрочное группа №3 по ГОСТ Р 52931-2008	-20...+75 °C
1986BE9x	ARM Cortex-M3	256 Мбайт	Вибропрочное группа F3 по ГОСТ Р 52931	-40...+85 °C

Показатели безотказности рассматриваемых типов микроконтроллеров были определены согласно методики расчета [4].

Средний ресурс определялся по формуле:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N}, \quad (1)$$

где T_{pi} – ресурс i -го микроконтроллера; N – количество микроконтроллеров, поставленных на испытания или эксплуатацию.

Статистическая оценка среднего времени восстановления вычислялась по формуле:

$$T_b = \frac{\sum_{i=1}^m T_{bi}}{m}, \quad (2)$$

где T_{bi} – время восстановления i -го микроконтроллера; m – количество восстановлений рассматриваемых объектов.

Коэффициент технического использования микроконтроллеров определялся по формуле:

$$K_{т.и} = \frac{T_0}{T_0 + \tau_{ТО} + \tau_p + \tau_b}, \quad (3)$$

где T_0 – суммарная наработка микроконтроллера; $\tau_{ТО}$ – время планового технического обслуживания микроконтроллера; τ_p – время, затрачиваемое на плановый ремонт; τ_b – время, затраченное на внеплановые восстановления микроконтроллера.

Далее в работе были определены количество работоспособных микроконтроллеров и вероятность безотказной работы на конец каждого временного интервала, результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета показателей безотказности микроконтроллеров

Наименование	Интервал времени, час	Количество отказавших изделий $n(t)$	Количество работоспособных изделий $N(t)$ к концу периода	Вероятность безотказной работы $P(t)$
RP2040	0 – 100	1	10	0,91
	100 – 200	3	13	0,78
MCS 51	0 – 100	1	12	0,93
	100 – 200	3	9	0,76
1986BE9x	0 – 100	1	15	0,92
	100 – 200	1	14	0,94

По представленному расчету вероятностям более 0,94 соответствуют значения наработки для микроконтроллеров типа 1986BE9x, которые и будут применены в системе приемопередатчика информации цифрового персонального помощника.

Данные исследования позволили подобрать оптимальный набор составных частей цифрового персонального помощника для работников железнодорожной отрасли.

В свою очередь достоверно отмечено, что применение цифрового персонального помощника при техническом осмотре позволит на 15% повысить качество и культуру производства технического обслуживания подвижного состава в пунктах технического обслуживания. Позволит повысить на 20% количество заблаговременно выявляемых неисправностей железнодорожного подвижного состава.

Список литературы

1. Методика и расчет показателей качества работы ПТО. [Электронный ресурс] URL: <https://helpiks.org/9-39635.html> (дата обращения: 05.10.2024).
2. Современные цифровые технологии. [Электронный ресурс] URL: <http://s-c-technologies.ru> (дата обращения: 15.10.2024).
3. Интеллектуальный виртуальный ассистент. [Электронный ресурс] URL: <https://picktech.ru/blog/tips/chto-takoe-virtualnyy-assistent-pochemu-on-nuzhen-biznesu> (дата обращения: 15.10.2024).
4. Эксплуатационная надежность электронных средств: учебное пособие для высшего профессионального образования / М.Т. Прасов, Ю.С. Степанов. Орел: ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2011. 238 с.

Шмойлов Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Shmoilov@inbox.ru, Россия, Самара, Приволжский государственный университет путей сообщения,

Лазаревич Никита Викторович, сотрудник, 2201878@stud.samgups.ru, Россия, Самара, Приволжский государственный университет путей сообщения

**IMPROVING THE PROCESS OF MAINTENANCE AND TROUBLESHOOTING OF
RAILWAY ROLLING STOCK**

A.N. Shmoilov, N.V. Lazarevich

The article is devoted to the issue of improving the process of technical maintenance of railway rolling stock. The paper highlights the advantages of using modern digital technologies in railway transport, implemented in the form of portable electronic devices with the functions of information electronic assistants for employees of maintenance points. A flowchart of the system for performing the information task of a digital personal assistant is presented. The configuration has been clarified and a comparison of different types of microcontrollers for the digital personal assistant information transceiver system has been carried out. The reliability indicators of the considered types of digital personal assistant microcontrollers are calculated.

Key words: maintenance, information support, rolling stock, digital personal assistant, voice request for information, flowchart, microcontroller.

Shmoilov Andrey Nikolaevich, candidate of engineering sciences, docent, Shmoilov@inbox.ru, Russia, Samara, Volga State Transport University,

Lazarevich Nikita Viktorovich, employee, 2201878@stud.samgups.ru, Russia, Samara, Volga State Transport University

УДК 621.876.11; 629.114.2

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-344-345

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЛИФТОВ (ЛОВИТЕЛЕЙ)

Л.А. Сладкова, Ван Инь

Нормативными документами к лифтам предъявляются повышенные требования безопасности, так как этот вид грузоподъемной техники сопряжен с перемещением людей. Для этой цели на лифтах применяют ловители, предотвращающие аварийную ситуацию. Принцип действия ловителей основан на самозаклинивании кабины на направляющих. Предлагаемое в статье конструктивное решение ловителя отличается простотой изготовления и безотказностью действия при обрыве каната подъема лифта. Методика расчета усилий в элементах конструкции ловителя основана на основных положениях теоретической механики для системы сходящихся сил. Расчеты, проведенные в программном продукте Painton в соответствии с представленным алгоритмом, позволяют оценить количественно и качественно изменение усилий в элементах предлагаемого устройства для лифта любой грузоподъемности. Анализ результатов расчета позволил установить изменение усилий в зависимости от углов сопряжения элементов конструкции, выявить характер их нагружения (растяжение / сжатие), что позволяет разработать концептуальную модель в целях усовершенствования конструкции ловителей путем введения дополнительных связей или устранения лишних.

Ключевые слова: лифты, ловитель, анализ конструкций, теоретические исследования, усилия в элементах конструкции, безопасность, расчет.

Введение

К лифтам, также как и ко всем грузоподъемным средствам предъявляются требования безопасности, обеспечение которой регламентировано ГОСТ Р 53780-2010 [1] «допускающим» использовать в лифтах устройства безопасности [2, 3] с учетом обязательной их сертификации:

- ограничители скорости для включения механизма привода ловителя кабины;
- ловители – для остановки и удержания кабины (противовеса) на направляющих в случае обрыва каната.

- буфер – для амортизации и остановки кабины.

Направляющие захваты и механизм превышения скорости установлены под кабиной лифта (клеткой) с небольшим намоточным барабаном, который соединен с регулятором превышения скорости стальным тросом. Регулятор превышения скорости оснащен захватом, так что, если скорость лифта превышает нормальную, он удерживает трос регулятора и прижимает захваты к направляющим, останавливая кабину лифта.

Для большинства лифтов ловители являются стандартными и основаны на самозаклинивании кабины (противовеса) на направляющих [4] при условии отсутствия тормозной силы, т.е. $P_T = 0$. Виды ловителей по конструктивному признаку приведены на рис. 1.

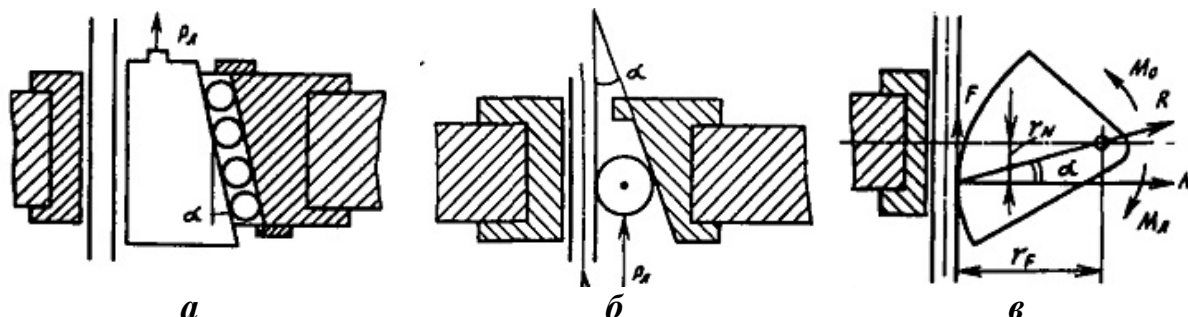


Рис. 1. Типы ловителей: а – клиновой; б – эксцентриковый; в – роликовый

Принцип действия приведенных выше механизмов – клиновой.

Авторами статьи [5] предложено устройство ограничения скорости перемещения лифта при движениях вверх и вниз за счет установки ограничителей на кабине и противовесе, что ведет к дублированию системы.

В патенте [6, 7] (№ ЕА 201700417 А1) принцип действия ловителя для ограничения скорости основан на прекращении подачи энергии на электромагнитное устройство стопора, что ведет к остановке кабины.

Автор в [7] гарантирует при движении кабины с открытыми дверями «посадку кабины на ловители» за счет движения каната в противоположном направлении по отношению к движению кабины. Этот же автор в [8] предлагает установить по всей длине направляющей пластину с отверстиями, в которые, в случае отказа системы будут входить при помощи рычажной системы стержни, связанные со створками дверей кабины.

Недостатком конструкции [9] является то, что оно может быть использована, только в лифтах, примыкающих к вертикальной стенке сооружения. Актуальность статьи связана с тем, что существующие системы безопасности не в полной мере обеспечивают безаварийную работу лифтов, что также было отмечено в трудах [10, 11, 12]. Также очевидно, что нередко случаи обрыва троса, что особенно характерно для лифтов устанавливаемых в большевысотных зданиях.

Известна система безопасности лифта [13], размещенная внутри шахты, содержащая ловитель, состоящий из фартука и нескольких жестких элементов и направляющих, и блокирующих средств. При этом блокиру-

ющие средства установлены для управления движением фартучных элементов.

Система безопасности лифтов [14], содержащая ловители, жестко установленные на соответствующих раздвигаемых подпорках, которые могут двигаться благодаря шарнирам. При свободном полете вниз ловители зацепляются за ближайшие к ним выступы.

Недостатками выше указанных устройств являются невысокая надежность системы безопасности и сложность конструкции.

Устройство ловителя. Предлагаемое ниже устройство (рис. 2) направлено на повышение безопасности лифтов при обрыве каната и позволяет повысить надежность безопасность лифтов в процессе эксплуатации.

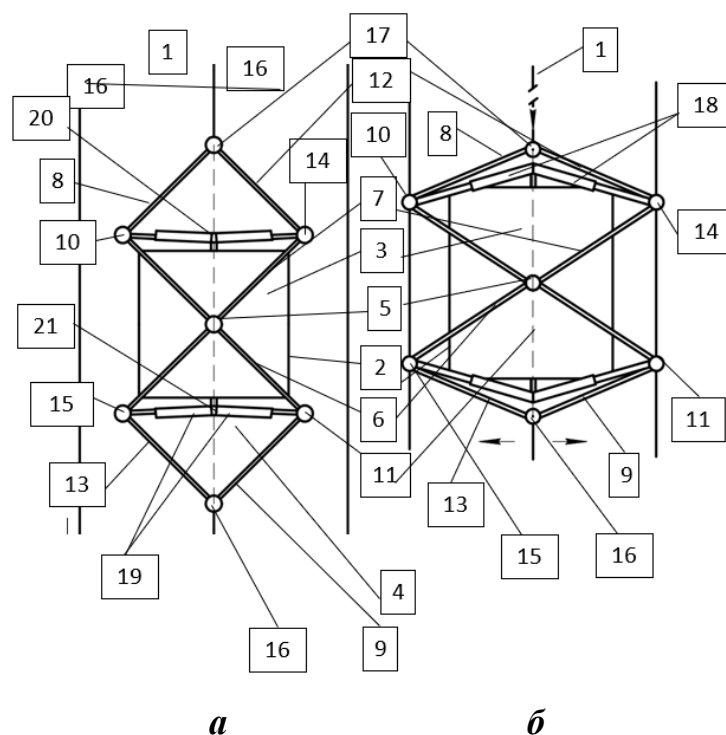


Рис. 2. Устройство безопасности лифтов: а – в рабочем состоянии; б – при обрыве каната

Устройство безопасности лифтов (рис. 2, а), включает канат 1 подъема лифта, соединенного с верхней частью (крышей) кабины лифта 2 отличающаяся тем, что канат подъема 1 кабины лифта 2 соединен с двумя последовательно расположенными шарнирными четырехзвенниками 3 и 4, включающими шарнир 5, соединяющий стержни 6 и 7 с возможностью их вращения относительно друг друга, причем к свободным концам стержня 6 присоединены стержни 8 и 9, при помощи шарниров 10 и 11, а к свободным концам стержня 7 присоединены стержни 12 и 13 при помощи шарниров 14 и 15, при этом свободные концы стержней 9 и 13 соединены шарниром 16, а свободные концы стержней 8 и 12 соединены шарниром 17, который соединен с канатом 1 подъема лифта, при этом шарниры 10 и 14, 11 и 15 соединены соответственно двухзвенниками 18 и 19 в центре которых

располагаются шарниры 20 и 21 соответственно, причем шарнир 20 жестко закреплен с верхней частью (крышей) кабины 2 лифта, а шарнир 21 - жестко закреплен с верхней частью (крышей) кабины 2 лифта.

При обрыве каната (рис. 2, б) 1 подъема кабины 2 лифта усилия в двухзвенниках 18 и 19 снижаются, что ведет к изменению положения всех стержней устройства за счет их поворота относительно сопряженных с ними шарниров, занимая шахтное пространство в точках опоры шарнирами 10 и 14, 11 и 15, соответственно.

При этом напряжения (усилия), возникающие в двухзвенниках 18 и 19 не позволяют конструкции терять жесткость. В случае аварии (обрыва каната) напряжения (усилия), приходящиеся в шарнирных двухзвенниках 18 и 19 снижаются, что ведет к складыванию шарнирных четырехзвенников, предотвращая падение кабины в шахту.

Предлагаемое техническое решение позволяет повысить надежность безопасность лифтов в процессе эксплуатации. В случае аварии (обрыва каната), (рис. 2, б) напряжения (усилия), приходящиеся в шарнирных двухзвенниках 18 и 19 снижаются, что ведет к складыванию шарнирных четырехзвенников, предотвращая падение кабины в шахту.

В первую очередь, для обеспечения безопасности предлагаемого устройства необходимо определить усилия, возникающие во всех элементах системы, используя основные положения механики.

Расчет усилий в элементах конструкции ловителя. В безаварийной ситуации (рис. 3) устройство представляет собой жесткую конструкцию в соответствии с основными положениями строительной механики [15, 16] и теоретической механики [15, 17].

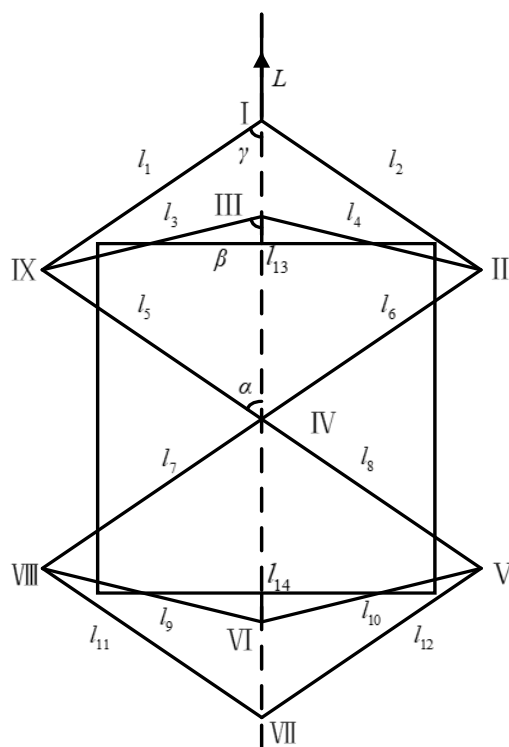
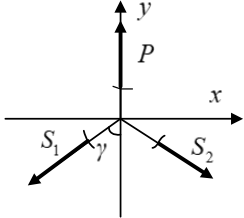
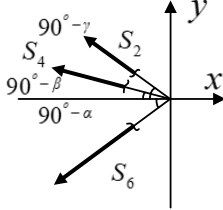
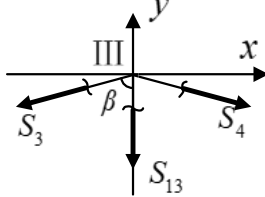
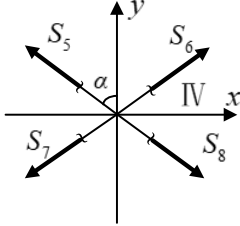
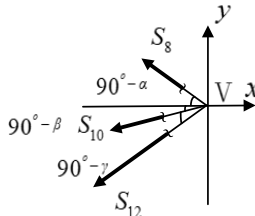


Рис. 3. Расчетная схема устройства безопасности лифта

Для решения используем метод вырезания узлов в соответствии с представленной расчетной схемой. Порядок расчета усилий в элементах конструкции ловителя приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения усилий в стержнях устройства

№ узла	Расчетная схема и система уравнений для определения усилий в стержнях	
I		$\begin{cases} -S_1 \sin \gamma + S_2 \sin \gamma = 0 \\ S_1 \cos \gamma + S_2 \cos \gamma = P \end{cases}$
II		$\begin{cases} -S_2 \cos(90^\circ - \gamma) - S_4 \cos(90^\circ - \beta) - S_6 \cos(90^\circ - \alpha) = 0 \\ S_2 \sin(90^\circ - \gamma) + S_4 \sin(90^\circ - \beta) - S_6 \sin(90^\circ - \alpha) = 0 \end{cases}$
III		$\begin{cases} -S_3 \sin \beta + S_4 \sin \beta = 0 \\ -S_3 \cos \beta - S_{13} - S_4 \cos \beta = 0 \end{cases}$
IV		$S_5 = S_6 = S_7 = S_8$
V		$\begin{cases} -S_8 \cos(90^\circ - \alpha) - S_{10} \cos(90^\circ - \beta) - S_{12} \cos(90^\circ - \gamma) = 0 \\ S_8 \sin(90^\circ - \alpha) - S_{10} \sin(90^\circ - \beta) - S_{12} \sin(90^\circ - \alpha) = 0 \end{cases}$

Система, представленная на рис. 3 Является симметричной, поэтому усилия в узлах VI -IX будут иметь значения аналогичные симметричному отражению узлов I-V.

Результаты для определения усилий в стержнях представлены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимости для определения усилий в стержнях

Усилие в стержне	Зависимость	Номер формулы
S_1	$\frac{P}{2\cos\gamma}$	(1)
S_2	$\frac{S_2\sin(\alpha + \gamma)}{\sin(\alpha + \beta)}$	(2)
S_3	$\frac{S_2\sin(\beta - \gamma)}{\sin(\alpha + \beta)}$	(3)
S_4	$\frac{S_8\sin(\alpha + \gamma)}{\sin(\gamma - \beta)}$	(4)
S_5	$\frac{S_8\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\beta - \gamma)}$	(5)
S_6	$-2S_4\cos\beta$	(6)
S_7		(7)
S_8		(8)
S_9		(9)
S_{10}		(10)
S_{11}		(11)
S_{12}		(12)
S_{13}		(13)
S_{14}		(14)

Расчет усилий в стержнях будем проводить при изменяющихся значениях α , β и γ в соответствии с представленной на рис. 4 блок-схемой в программном комплексе Rauntон.

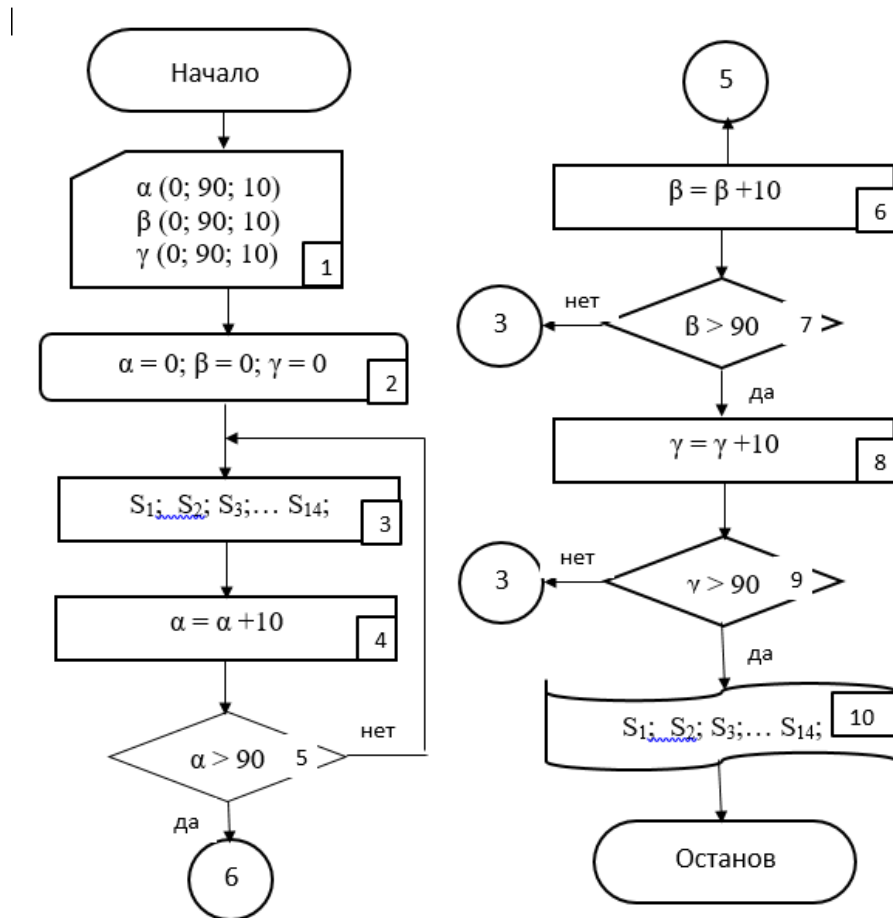


Рис. 4. Блок-схема вычислений

В результате проведения расчета установлено, что

- усилия в стержнях 1 и 2 не зависят от изменения углов α и β в соответствии с зависимостью (1);
- усилия в стержнях 1, 2, 11, и 12 равны в зависимости от изменения любого угла α , β и γ в диапазоне от 0 до 90° при любом положении системы (табл. 3), причем все стержни являются растянутыми.

Таблица 3

Порядок изменения усилий в стержнях

Углы (рис. 3)			Усилия S_i в стержнях					
α	β	γ	1,2	3,4	5,6,7,8	9,10	11,12	13,14
10,001	0,001	0,001	0,5	-0,5	0			-1
10,001	0,001	10,001	0,507	-0,999	-0,507	-0,999	0,507	-1,999
10,001	0,001	20,001	0,532	-1,531	-1,047	-1,531	0,532	-3,063
10,001	0,001	30,001	0,577	-2,136	-1,662	-2,136	0,577	-4,273
10,001	0,001	40,001	0,652	-2,878	-2,415	-2,878	0,652	-5,757
10,001	0,001	50,001	0,777	-3,878	-3,430	-3,878	0,777	-7,757
10,001	0,001	60,001	1,000	-5,410	-4,986	-5,410	1,000	-10,82
10,001	0,001	70,001	1,461	-8,289	-7,909	-8,289	1,461	-16,57
10,001	0,001	80,001	2,87967	-16,58	-16,32	-16,58	2,87967	-33,16

Проанализируем характер изменения усилий в других стержнях системы на рис. 3. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Изменение усилий в стержнях 1, 2, 11, и 12 в зависимости от изменения углов α , β , γ

№ п/п	Угол α , β , γ	Усилия S_i в стержнях в единицах измерения силы P
1	0,001	0,5
2	10,001	0,507715
3	20,001	0,532092
4	30,001	0,577356
5	40,001	0,652713
6	50,001	0,777878
7	60,001	1,00003
8	70,001	1,461972
9	80,001	2,87967

Истинную величину усилий S_i в зависимости от силы P определяем, как произведение расчетной величины S_i на модуль силы P .

Усилия в стержнях 3, 4, 9, 10 изменяются в зависимости от углов β и γ , оставаясь неизменными при различных значениях угла α . При этом стержни работают на сжатие.

Стержни 5, 6, 7 и 8 работают на сжатие и изменяются в зависимости от «перебора» углов α , β , γ .

Графическая интерпретация изменения усилий в стержнях представлена на рис. 5.

Аналитическое изменение усилий в стержнях, представленных на рис. 5 приведены в табл. 5.

Графическое представление усилий в других стержнях приведены на рис. 6, а аналитическое описание в табл. 6 соответственно.

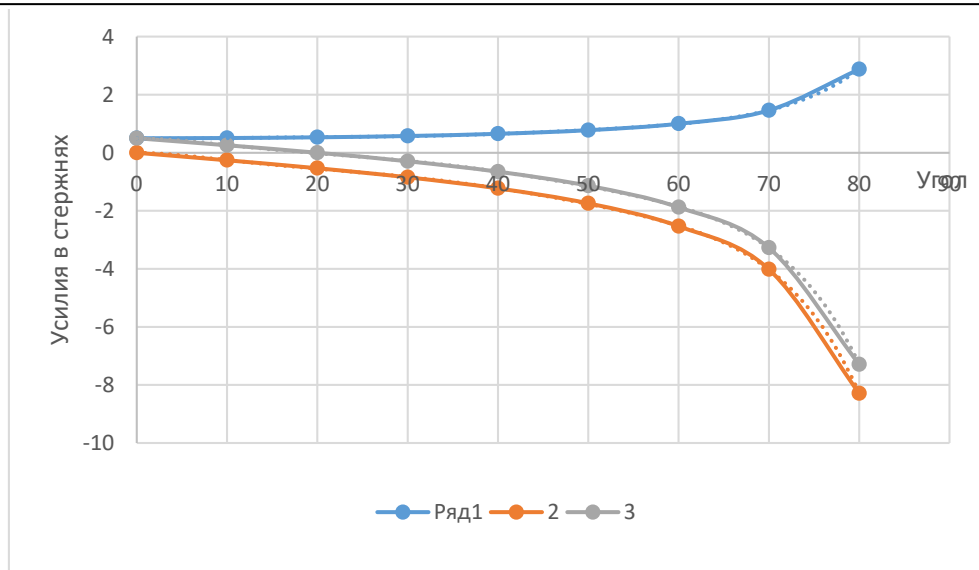


**Рис. 5. Изменение усилий в стержнях при $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\gamma \in (0; 90)$:
1 ряд – $S_{1,2}$; 2 ряд – $S_{3,4,9,10}$; 3 ряд – $S_{5,6,7,8}$**

Таблица 5

Изменение усилий в стержнях

Ряд	Усилие в стержнях, S_i	*) Изменение усилий в стержнях при $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\gamma \in (0; 90)$
1	1, 2	$y = 2E-10x^6 - 4E-08x^5 + 3E-06x^4 - 9E-05x^3 + 0,0015x^2 - 0,0078x + 0,5004$
2	3, 4, 9, 10	$y = -5E-10x^6 + 1E-07x^5 - 7E-06x^4 + 0,0003x^3 - 0,004x^2 - 0,0025x + 0,4987$
3	5, 6, 7, 8	$y = -5E-10x^6 + 1E-07x^5 - 7E-06x^4 + 0,0003x^3 - 0,004x^2 - 0,0025x + 0,4987$

*) Здесь $y = S_i$; $x = \gamma$

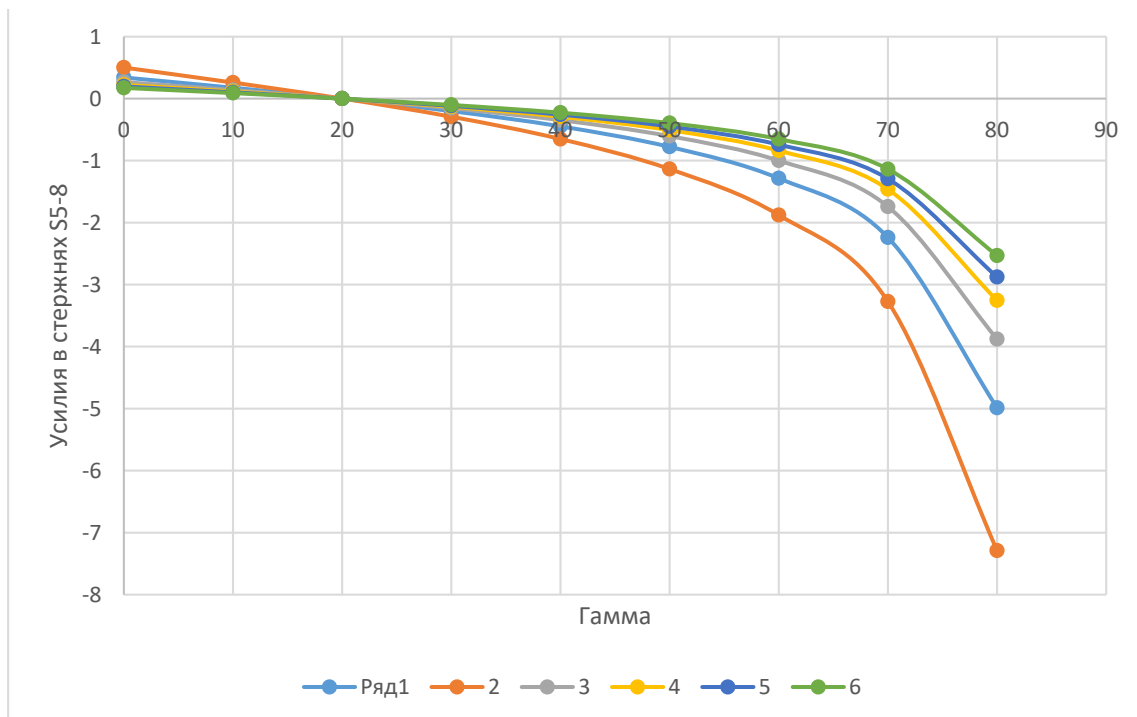


**Рис. 6. Изменение усилий в стержнях 5, 6, 7, 8 в зависимости от изменения угла α при $\beta = 0^\circ$, $\gamma \in (0; 90)$:
1 ряд – при $\alpha = 0^\circ$; 2 ряд – при $\alpha = 10^\circ$; 3 ряд – при $\alpha = 20^\circ$;
4 ряд – при $\alpha = 30^\circ$; 5 ряд – при $\alpha = 40^\circ$; 6 ряд – при $\alpha = 80^\circ$**

Стержни в пределах изменения угла γ от 0 до 10° – растянуты. При дальнейшем увеличении угла γ работают на сжатие.

Таблица 6
Изменение усилий в стержнях 5, 6, 7, 8 в зависимости от изменения угла α при $\beta = 0^\circ$, $\gamma \in (0; 90)$

Ряд	α	^{*)} Изменение усилий в стержнях 3, 4, 9, 10 при различных углах α , $\beta = 0^\circ$, $\gamma \in (0; 90)$
1	10	$y = -4E-10x^6 + 7E-08x^5 - 5E-06x^4 + 0,0002x^3 - 0,0027x^2 - 0,0017x + 0,3412$
2	0	$y = -5E-10x^6 + 1E-07x^5 - 7E-06x^4 + 0,0003x^3 - 0,004x^2 - 0,0025x + 0,4987$
3	20	$y = -3E-10x^6 + 5E-08x^5 - 4E-06x^4 + 0,0001x^3 - 0,0021x^2 - 0,0013x + 0,2654$
4	30	$y = -2E-10x^6 + 4E-08x^5 - 3E-06x^4 + 0,0001x^3 - 0,0018x^2 - 0,0011x + 0,2227$
5	40	$y = -2E-10x^6 + 4E-08x^5 - 3E-06x^4 + 0,0001x^3 - 0,0016x^2 - 0,001x + 0,197$
6	80	$y = -2E-10x^6 + 4E-08x^5 - 3E-06x^4 + 9E-05x^3 - 0,0014x^2 - 0,0009x + 0,1732$

^{*)} Здесь $y = S$; $x = \gamma$

Графическое представление усилий в других стержнях приведены на рис. 7, а аналитическое описание в табл. 6 соответственно.

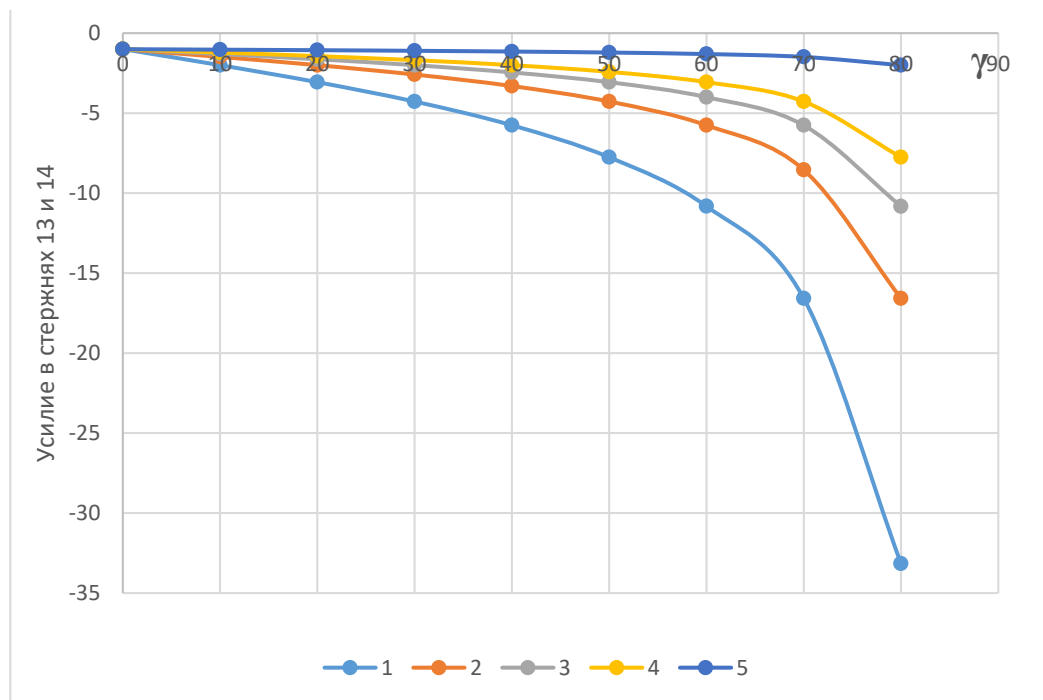


Рис. 7. Изменение усилий в стержнях 13 и 14 в зависимости от изменения угла α при $\beta = 0^\circ$, $\gamma \in (0; 90)$: 1 ряд – при $\alpha = 0^\circ$; 2 ряд – при $\alpha = 10^\circ$; 3 ряд – при $\alpha = 20^\circ$; 4 ряд – при $\alpha = 30^\circ$; 5 ряд – при $\alpha = 80^\circ$

Таблица 7
Изменение усилий в стержнях 13 и 14 в зависимости от изменения угла α при $\beta = 0^\circ$, $\gamma \in (0; 90)$

Ряд	α	^{*)} Изменение усилий в стержнях 13 и 14 при различных углах α , $\beta = 0^\circ$, $\gamma \in (0; 90)$
1	0	$y = -2E-09x^6 + 4E-07x^5 - 3E-05x^4 + 0,0011x^3 - 0,0165x^2 - 0,0101x - 1,005$
2	10	$y = -1E-09x^6 + 2E-07x^5 - 1E-05x^4 + 0,0005x^3 - 0,008x^2 - 0,0049x - 1,0024$
3	20	$y = -7E-10x^6 + 1E-07x^5 - 9E-06x^4 + 0,0003x^3 - 0,005x^2 - 0,0031x - 1,0015$
4	30	$y = -5E-10x^6 + 9E-08x^5 - 6E-06x^4 + 0,0002x^3 - 0,0035x^2 - 0,0021x - 1,001$
5	80	$y = -7E-11x^6 + 1E-08x^5 - 1E-06x^4 + 3E-05x^3 - 0,0005x^2 - 0,0003x - 1,0002$

^{*)} Здесь $y = S$; $x = \gamma$

При внесении изменений в конструкцию лифта требуется привлечение квалифицированного персонала и согласование со службами сертификации [18], так как они (лифты) должны отвечать требованиям безопасности в течение всего назначенного изготовителем срока службы и комплектоваться сопроводительной документацией на государственном языке государства - члена Таможенного союза и (или) на русском языке [19].

Вывод. Изменение усилий в зависимости от углов сопряжения элементов конструкции, позволяет выявить характер их нагружения (растяжение / сжатие), и разработать концептуальную модель в целях усовершенствования конструкции ловителей путем введения дополнительных связей или устранения лишних.

Список литературы

1. ГОСТ Р 53780-2010 (ЕН 81-1:1998, ЕН 81-2:1998). Национальный стандарт Российской Федерации. Лифты. Общие требования безопасности к устройству и установке. М., Стандартинформ, 2012. 81 с.
2. Рисунки. [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/images/search?img_url (дата обращения: 10.05.2024).
3. Подробный обзор механизмов безопасности в лифтах. [Электронный ресурс] URL: <https://lift.kz/articles/lifty/podrobnyy-obzor-mekhanizmov-bezopasnosti-v-liftakh> (дата обращения: 10.05.2024).
4. Лифты. / Г.Г.Архангельский, Д.П.Волков, Э.А.Горбунов, А.А.Ионов, В.Я. Ткаченко, П.И. Чутчиков; под общ. ред. Д.П. Волкова. М.: Машиностроение, 1999. 458 с.
5. Куцеполенко А.В., Антонец А.И., Непша Д.В. Современные средства обеспечения безопасности во время движения кабины лифта вверх и при ее остановке в этажной площадке // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 6. С. 460–469.
6. Patent No EA 201700417 (A1). Device for Pulley Blocking / V. F. Komoza, O. A. Dobrinovich, S. V. Pavlov, I. N. Balabanov. Publ. date 31.01.2019. Mode of access: [Electronic resource]: <https://ru.espacenet.com/publicationDetails/bib> (дата обращения: 10.05.2024).
7. Патент RU 2735336 C1. Способ механической блокировки движения кабины лифта с открытыми кабинными дверями и устройство для его осуществления / А.Г. Данилов. Оpubл. 15.10.2020. Бюл. 36.
8. Патент RU 2740226 C1. Способ механической блокировки движения кабины лифта с открытыми кабинными дверями / А.Г. Данилов. Оpubл. 12.09.2021, Бюл. 34.
9. Патент RU 2253604 C2. Лифт и устройство включения ловителей кабины лифта с подвешенным на траверсе купе / Ю.В. Князькин, В.М. Троицкий, Ю.В. Матвейкин, О.А. Голишев. Оpubл. 14.07.2005. Бюл. 28.
10. Алтунин К.В. Разработка новой механической системы безопасности лифта. // Главный инженер. Управление промышленным производством. 2020. 6. 48 с.

11. Короткий А.А., Колганов В.П. Повышение безопасности лифтов путем применения цифровых технологий // Научная электронная библиотека «КиберЛенинка» (сайт). [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-bezopasnosti-liftovmputem-primeneniya-tsifrovyyh-tehnologiy> (дата обращения: 10.05.2024)..
12. Глава НССО: За последние 3 года произошло около 100 аварий с лифтами // Клуб журналистов korins.ru (сайт). [Электронный ресурс] URL: <http://www.korins.ru/posts/1504> (дата обращения: 20.01.2025).
13. Патент RU 2380311C2. Система безопасности лифта: / Фолькнер Д.Е. опубл. 27.01.2010. Бюл 4.
14. Патент RU 2679750 C2. Система безопасности лифта / Алтунин К.В.: Опубл. 12.02.2019. Бюл.7
15. Сладкова Л.А., Ногин О.Р., Неклюдов А.Н. Механика. Балашиха, ВА РКСН им. Петра Великого, 2023. 498 с.
16. Доценко И.С. Строительная механика. Киев, Вища школа, 1976. 296 с.
17. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 2010. 416 с.
18. ГОСТ Р 55964-2022. Лифты. Общие требования безопасности при эксплуатации. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 28 с.
19. ТР ТС 011/2011. Технический регламент таможенного союза. Безопасность лифтов (с изменениями на 19 декабря 2019 года) / Официальный сайт Евразийского экономического союза [Электронный ресурс] URL: www.eaeunion.org (дата обращения: 10.05.2024).

Сладкова Любовь Александровна, д-р техн. наук, профессор, rich.cat2012@yandex.ru, Россия, Москва, Российский университет транспорта,

Ван Инь, аспирант, chuan_wu@126.com, Россия, Москва, Российский университет транспорта

THEORETICAL STUDIES OF THE ELEVATOR SAFETY DEVICE (CATCHERS)

L.A. Sladkova, Wang Yin

Regulatory documents impose increased safety requirements on elevators, since this type of lifting equipment is associated with the movement of people. For this purpose, catchers are used on elevators to prevent an emergency. The principle of operation of the catchers is based on the self-jamming of the cabin on the guides. The design solution of the catcher proposed in the article is distinguished by its ease of manufacture and trouble-free operation in case of a break in the elevator lifting rope. The method of calculating the forces in the elements of the catcher structure is based on the basic provisions of theoretical mechanics for the system of converging forces. Calculations carried out in the Painton software product in accordance with the presented algorithm make it possible to quantitatively and qualitatively assess the change in the forces in the elements of the proposed device for an elevator of any carrying capacity. Analysis of the calculation results made it possible to establish the change in forces depending on the interfaces of the structural elements, to identify the nature of their loading (tension / compression), which makes it possible to develop a conceptual model in order to improve the design of the catchers by introducing additional connections or eliminating unnecessary ones.

Key words: elevators, catcher, structural analysis, theoretical studies, forces in structural elements, safety, calculation.

Sladkova Lyubov Aleksandrovna, doctor of technical sciences, professor, rich.cat2012@yandex.ru, Russia, Moscow, Russian University of Transport,

Wang Yin, postgraduate, chuan_wy@126.com, Russia, Moscow, Russian University of Transport

УДК 65.07 67.03

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-355-356

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННОГО СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «ВЕДОМОЕ КОЛЕСО» МАСЛЯНОГО НАСОСА КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА «RIBON RU-100»

В.Б. Масягин, С.Б. Скобелев, Д.А. Ерофеев, Е.А. Ерофеев

В работе приведено обоснование замены материала для детали «Ведомое колесо» масляного насоса с текстолита марки ПТК на слоистый композиционный материал анизотропного армирования. Представлена конструкция слоистого композиционного материала, состоящая из сетки из стекловолокна, стеклоткани конструкционной армирующей марки Т-11, шпона дуба с умеренной средней пористостью и клеевого состава на основе эпоксидной смолы. Приведена технология получения композиционного материала, представлены результаты экспериментальных исследований образцов из данного материала на разрыв и сжатие. Применение полученного слоистого композиционного материала для изготовления детали «Ведомое колесо» позволит повысить долговечность работы детали в узле масляного насоса.

Ключевые слова: слоистый композиционный материал, узел масляного насоса, зубчатое зацепление, анизотропное армирование, стеклоткань, стекловолокно, зубчатое колесо

Для обеспечения показателей точности и высокой производительности работы металлообрабатывающего оборудования необходимо своевременное эксплуатационное обслуживание рабочих органов и подвижных частей. Из чего следует, что своевременная и надлежащая смазка рабочих органов и сопрягаемых поверхностей, является обязательной процедурой как в процессе эксплуатации, так и в процессе периодического обслуживания оборудования.

За подачу смазывающей жидкости в отдельные узлы и агрегаты круглошлифовального станка RIBON RU-100, такие как шпиндель шлифовальной бабки, механизм поперечной подачи, а также автоматическую смазку направляющих стола отвечает узел масляного насоса (УМН).

Основными недостатками при эксплуатации рассматриваемого узла масляного насоса являются сильный шум, а также последующее разрушение самого зубчатого венца ведомого колеса (рис. 1). Причиной перечисленных недостатков являются: высокая скорость вращения, неправильность прилегания зубьев, недостаточная точность зубчатого зацепления, несоответствующая форма пятна контакта, свойства материала, из которого изготовленно ведомое колесо [1, 2].



Рис. 1. Дефект в виде истирания зубчатого венца на ведомом колесе узла масляного насоса

В рассматриваемой конструкции узла масляного насоса круглошлифовального станка RIBON RU-100 ведомое колесо изготовлено из текстолита марки ПТК – поделочного текстолита конструкционного горячего прессования, ГОСТ 5-78. Связующими элементами в материале являются фенолформальдегидная смола и наполнитель в виде хлопчатобумажной ткани, обладающей повышенной прочностью и износостойкостью [3]. Зубчатые колёса, изготовленные из данного материала, являются хорошим диэлектриком и обладают повышенными антифрикционными свойствами, то есть низким коэффициентом трения [4]. Однако, исходя из практического применения, при работе зубчатых колёс, изготовленных из композиционного материала на основе наполнителя в виде хлопчатобумажной ткани, выявлен недостаток в виде механического разрушения.

Исходя из недостатков применения текстолита марки ПТК для изготовления ведомого колеса, предложена замена материала детали на конструкционный слоистый композитный материал (КМ) анизотропного армирования. Опытный образец ведомого колеса специально разрабатывался и изготавливался, с учётом таких параметров, чтобы превосходить по прочности и жёсткости колесо, изготовленное из текстолита марки ПТК.

Предложенный композиционный материал состоит из следующих компонентов:

1. Сетка из стекловолокна (рис. 2) – серпянка на основе алюмоборосиликатного составляющего (Е-стекло). Применяется в качестве промежу-

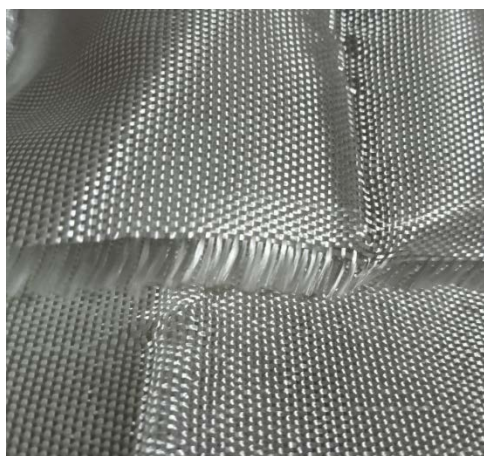
точного армирования совместно с нанесением клеевого состава на каждый слой наполнителя. Вместе с клеем (олигомер эпоксидной группы), является основным связующим веществом (матрицей) общей конструкции слоистого композиционного материала.

Достоинствами применения такой сетки являются: пластичность изделия при изгибе в рабочих нагрузках, повышение адгезионных свойств, стойкость к щелочным средам и перепаду температур, противостояние коррозии, снижение вероятности образования вздутий от воздушных пузырей при нанесении клеевого состава.

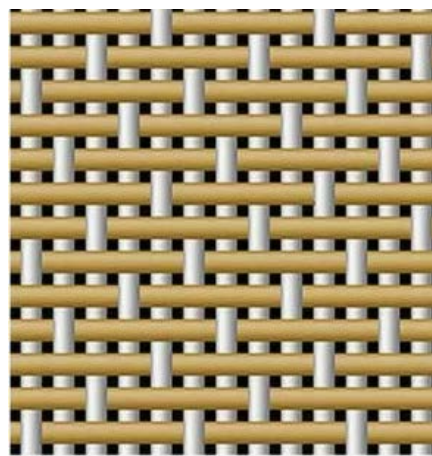


Рис. 2. Сетка из стекловолокна

2. Стеклоткань конструкционная армирующая марки Т-11 силан 92, двухосного (двухмерного) плетения (рис. 3, а, б) является главным компонентом, представляющего основу общего наполнителя.



а



б

**Рис. 3. Стеклоткань конструкционная армирующая:
а – внешний вид стеклоткани; б – схема плетения**

В общем виде применяется в качестве каркасной основы для стеклопластиков и изделий из них, получаемой методом пропитки клеевым составом на основе эпоксидных и полиэфирных смол с дальнейшим формированием в общую конструкцию.

Благодаря применению стеклоткани повышается устойчивость всей конструкции к вибрационным нагрузкам, увеличивается сопротивление к растяжению и разрыву, повышается коррозионная стойкость. Поверхностная плотность нити плетения составляет 385 г/м², поэтому достигается высокая плотность всей конструкции в сочетании с клеевым составом. Рабочая температура используемой стеклоткани имеет диапазон от -200 °С до +550 °С.

3. Шпон (рис. 4, а) – волокнистый биоматериал, применяется в виде тонких пластинок природной древесины. Использован шпон дуба с умеренной средней пористостью (рис. 4, б).



а



б

Рис. 4. Шпон дуба: а – внешний вид шпона; б – пористость структуры

Используемая толщина пластины 0,1 мм (100 мкм). Повышенная шероховатость поверхности обеспечивает высокую адгезию межслойного соединения за счёт естественной пористой структуры (рис. 4, б). Применение шпона дуба обусловлено тем, что древесная волокнистая структура способствует повышению пропитываемости клеевым составом, обеспечивая при этом повышенную межслойную склеиваемость. Природная основа данного биоматериала обеспечивает мягкость в работе общей конструкции и способствует компенсации ударных нагрузок при разгоне и запуске блока шестерен.

4. Клеевой состав (эпоксидная смола) (рис. 5, а, б) – компаунд эпоксидный (олигомер), представляет собой органическое соединение, входящее в группу эпоксидных смол. Используемая эпоксидная смола является связующей основой в разрабатываемом композиционном материале. Применялась смола стандартная эпоксидно-диановая неотверждённая ЭД-20, ГОСТ 10587-84 [5]. Применяемый отвердитель «ПЭПА» полиэтиленполиамин, пропорции соединения (смешивания) – 10:1.

Соединение компонентов осуществлялось последовательно, при температуре не ниже 20°С с медленным вводом отвердителя при периодическом равномерном перемешивании. Желатинизация клеевого состава со-

ставляла от 4 до 16 часов. Полное отверждение состава в изделии - до 24 часов. Нанесение осуществлялось ручным способом с помощью кисти.

Достоинствами применяемого клеевого состава являются: двухкомпонентность состава – смола плюс отвердитель, что является гарантией процесса затвердевания; в процессе отверждения образуется общее твёрдое монолитное образование, т. е. клеевой состав является также связующим полимером; поскольку все используемые армирующие компоненты имеют пористую, либо сетчатую структуру, то клеевой состав в виде эпоксидной смолы после пропитывания и затвердевания составляет общую матрицу изготавливаемого композиционного материала.



а



б

Рис. 5. Клеевой состав: а – без отвердителя (однокомпонентность); б – с отвердителем (двухкомпонентность)

Недостатком данного клеевого состава является то, что он не применяется к материалам, обладающим гладкой и не пористой поверхностью, поскольку снижаются адгезионные свойства [6].

Получаемый материал для изготовления зубчатого ведомого колеса, следует охарактеризовать как твердофазный, двумерный, слоистый композиционный материал анизотропного армирования [7].

Процесс изготовления композиционного материала заключался в соединении «слоёв» за счёт последовательного склеивания методом холодного прессования под определённым давлением с применением электрического пресса. Холодное прессование является традиционным методом при изготовлении слоистых композитов. На рис. 6 представлена схема изготавливаемого композиционного материала.

Схема, представленная на рис. 6, показывает, что вся конструкция состоит из повторяющихся модулей, соединённых друг с другом по всей площади контакта с помощью клеевого состава.

Процесс укладки проходил с соблюдением следующих технических требований:

На каждый отдельный слой материала перед укладкой наносился клеевой состав (Γ), в результате чего, следующий слой вступал в контакт уже с нанесённым клеевым покрытием, поэтому склеивание двух разных наполнителей происходило при двойном слое клеевого состава (рис. 7).

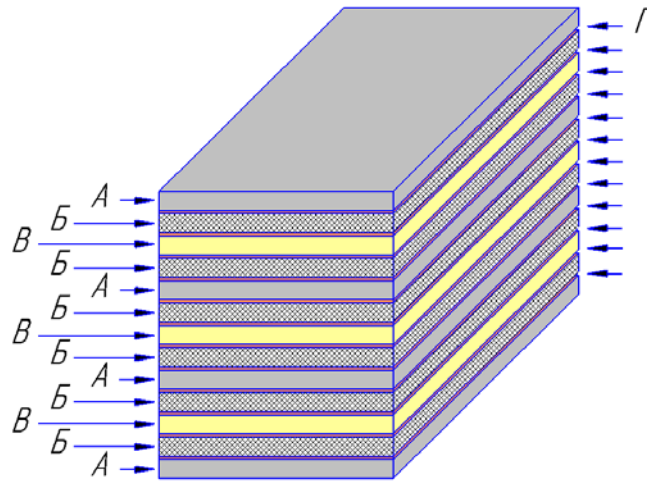


Рис. 6. Схема конструкции изготавливаемого композиционного материала: А – стеклоткань конструкционная, армирующая; В – сетка из стекловолокна; В – шпон природной древесины; Γ – клеевой состав (эпоксидная смола)

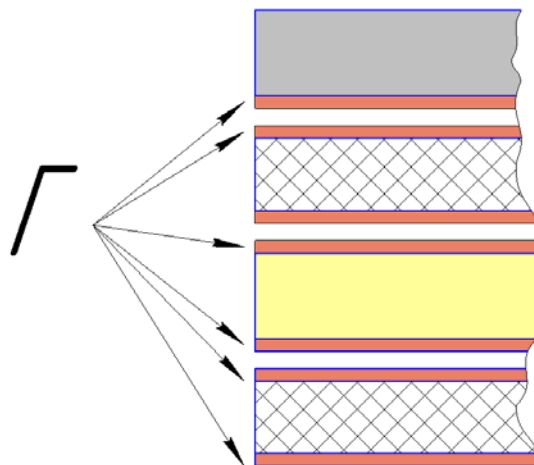
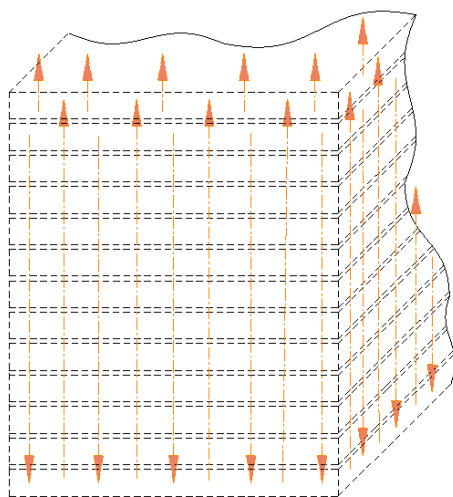


Рис. 7. Схема нанесения клеевого состава на отдельные слои материала

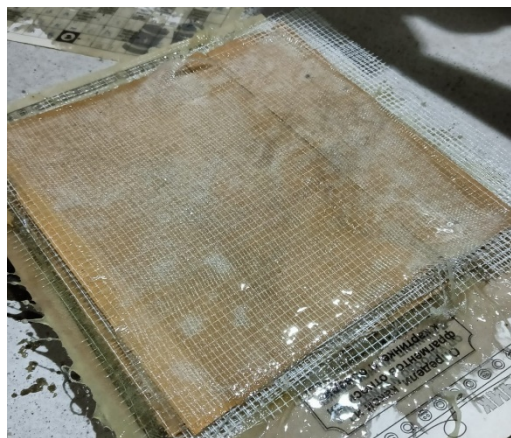
После каждого слоя конструкции композиционного материала устанавливалась стеклоткань (B), в результате чего происходило соединение основных наполнителей (A) и (B) клеевым составом, армированным стеклотканью, т.е. клеевой состав (Γ) участвовал в композиции уже в армированном виде (рис. 6).

Так как все материалы, входящие в состав общей конструкции, имеют повышенную «пористость» или сетчатую структуру, то вся конструкция композиционного материала обладает повышенной пропитываемостью при приложенном давлении (рис. 8, а, б).

Процесс холодного прессования с последующим отверждением материала проводился на механическом электро-винтовом прессе с электроприводом. Рабочее усилие составляло от 250 Н, процесс сдавливания и последующего отверждения материала проходил непосредственно в механическом прессе (после загрузки) в течение 24 часов. Общая толщина разрабатываемого материала определялась исходя из заданной толщины ведомого колеса масляного насоса ($h=7,2$ мм). Поэтому были получены две заготовки $h=15$ мм и $h=8$ мм.



а



б

Рис. 8. Процесс получения композиционного материала:
а – схема распределения клеевого состава; б – нанесение клеевого состава

Полученные образцы материала были испытаны на разрыв и на сжатие. Для испытания на разрыв использовалась машина разрывная «ЗИМ» Р-20. Образцы, закреплялись поочерёдно в разрывную машину с соблюдением всех технических требований так, чтобы прикладываемая растягивающая нагрузка по вектору совпадала с осью испытываемых образцов.

По результатам исследования установлено, что для разработанного композиционного материала разрыв произошел при нагрузке 2300 Н, что превышает значения для композитного материала на основе полиуретановых составляющих (1800 Н) и для материала с промежуточной межслойной связкой (1950 Н) [8].

Испытания на сжатие проводились с помощью пресса холодного прессования электро-винтового, с номинальным усилием от 250 Н. В результате испытаний установлено, что при максимальной нагрузке в 80 КН произошло полное разрушение матричного композитного материала на основе полиуретановых составляющих, на 80% разрушился композитный материал с промежуточной межслойной связкой и на 60% армированный композитный материал [8].

Выводы и заключения:

1. С целью повышения долговечности работы детали «Ведомое колесо» узла масляного насоса круглошлифовального станка Ribon RU-100 предложена замена материала ПТК – поделочного текстолита конструкционного горячего прессования на слоистый композитный материал анизотропного армирования.
2. Спроектирован и изготовлен слоистый композитный материал, состоящий из сетки из стекловолокна, стеклоткани, шпона дуба и клеевого состава на основе эпоксидной смолы.
3. По результатам испытаний образцов из слоистого композитного материала на разрыв установлено, что для разработанного композиционного материала разрыв произошел при нагрузке 2300 Н, что превышает значения для композитного материала на основе полиуретановых составляющих (1800 Н) и для материала с промежуточной межслойной связкой (1950 Н).
4. В результате испытаний на сжатие установлено, что при максимальной нагрузке в 80 КН произошло полное разрушение матричного композитного материала на основе полиуретановых составляющих, на 80% разрушился композитный материал с промежуточной межслойной связкой и на 60% разработанный композитный материал.

Список литературы

1. Косарев О.И. Способы снижения возбуждения и вибраций в прямозубом зацеплении // Вестник машиностроения. 2001. №4. С. 8–14.
2. Рудницкий В.Н. Влияние геометрических параметров зубчатых колес на шум в зубчатых передачах // Вклад ученых и специалистов в национальную экономику. Брянск. БГИТА, 2001. С. 125–128.
3. ГОСТ 5-78. Текстолит и асботекстолит конструкционные. Технические условия. М.: Издательство стандартов. 1992. 28 с.
4. Штучный Б.П. Обработка пластмасс резанием. Издательство «Машиностроение». 1974. 145 с.
5. ГОСТ 10587-84. Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия. М.: Издательство стандартов. 1985. 20 с.
6. Изготовление слоистого композитного материала методом склеивания, на основе винилового полимера (органическое стекло), армированного синтетическим волокном (полимерная сетка) / Д. А. Ерофеев, Е. А. Ерофеев, Л. В. Кононенко, А. А. Капран // EUROPEAN RESEARCH : сборник статей XXXI Международной научно-практической конференции, Пенза, 27 марта 2021 года. Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2021. С. 109-121. EDN HNEKUF.
7. Композиционные материалы: справочник / В.В. Васильев [и др.]; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. М.: Машиностроение. 1990. 512 с.

8. Исследование свойств матричных композитных материалов на основе полимерных лакокрасочных составляющих / В.Б. Масыгин, С.Б. Скобелев, Е.А. Ерофеев, Д.А. Ерофеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 434-440. DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-434-435. EDN JXSPGK.

Масыгин Василий Борисович, канд. техн. наук, доцент, masaginvb@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Скобелев Станислав Борисович, канд. техн. наук, доцент, skobelew@rambler.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Ерофеев Денис Александрович, аспирант, den-is.erofeev.77@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Ерофеев Евгений Александрович, аспирант, ewgen_77@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL LAYERED COMPOSITE MATERIAL FOR
MANUFACTURING THE "DRIVE WHEEL" PART OF THE OIL PUMP OF THE "RIBON
RU-100" CYLINDRICAL GRINDING MACHINE

V.B. Masyagin, S.B. Skobelev, D.A. Erofeev, E.A. Erofeev,

The paper substantiates the replacement of the material for the part "Driven wheel" of the oil pump from textolite brand PTK to a layered composite material of anisotropic reinforcement. The design of the layered composite material is presented, consisting of a fiberglass mesh, glass fabric of structural reinforcing brand T-11, oak veneer with moderate average porosity and an adhesive composition based on epoxy resin. The technology of obtaining the composite material is given, the results of experimental studies of samples from this material for tensile and compression are presented. The use of the obtained layered composite material for the manufacture of the part "Driven wheel" will increase the service life of the part in the oil pump unit.

Key words: layered composite material, oil pump unit, gearing, anisotropic reinforcement, fiberglass, fiberglass, toothed wheel

Masyagin Vasiliy Borisovich, candidate of technical sciences, docent, masaginvb@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Skobelev Stanislav Borisovich, candidate of technical sciences, docent, skobelew@rambler.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

Erofeev Denis Alexandrovich, postgraduate, denis.erofeev.77@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Erofeev Yevgeniy Alexandrovich, postgraduate, ewgen_77@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 62.24

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-364-365

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛИНЕЙНОГО ПНЕВМОПРИВОДА С ПОМОЩЬЮ ВНЕСЕНИЯ ОРИГИНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЮ

А.В. Костенко

Целевым назначением пневматических цилиндров является линейное передвижение рабочего элемента в станках и прочем оборудовании. Боковые нагрузки воздействуют на шток пневмоцилиндра по схеме рычага первого рода. Следовательно, при увеличении хода боковые нагрузки на уплотнения и направляющие штока и поршня возрастают кратно длине хода и приводят их к износу. Это является критическим фактором для ресурса приводов с большими ходами. При интенсивной работе привода можно нередко наблюдать не только утрату изнашиваемых деталей, но и износ на внутренней поверхности гильзы цилиндра и поверхности поршня. Это достаточно серьезная проблема, влекущая за собой выход из строя пневмоцилиндра. На сегодняшний день, производители для решения данной проблемы увеличивают длину поршня, при больших боковых нагрузках вынуждены использовать цилиндры с дополнительными направляющими и др. Это значительно удорожает и усложняет конструкцию, увеличивает габариты и массу. Предлагается конструктивное изменение пневмоцилиндра: перенос тяжёлых шпилек крышек цилиндра во внутреннюю часть гильзы. Предлагаемое оригинальное решение значительно улучшает важные качественные показатели пневматических цилиндров, расширяет их возможности в исполнении с длинным ходом. А именно: повышенное сопротивление к боковым нагрузкам и силам кручения; повышенная точность (уменьшенное отклонение по углу); аксиальное расположение портов; внутренний монтаж датчиков положения; неповоротный шток в базовом исполнении, а не опционально; «гигиенический» дизайн корпуса.

Ключевые слова: пневмопривод, пневмоцилиндр, неповоротный шток, боковая нагрузка, износ гильзы цилиндра.

Пневмопривод характеризуется большим быстродействием, высокими показателями по мощности, усилию и массе. Простота конструкции, дешевизна, удобство в эксплуатации и обслуживании выгодно отличают этот вид привода от электрического и гидравлического приводов.

Основные положительные качества пневматических исполнительных механизмов:

- работа при больших колебаниях температуры воздуха, тогда как при этих условиях масло резко меняет свою вязкость. Кроме того, при повышении температуры может возникнуть нежелательное явление кавитации;

- скорости пневматических исполнительных механизмов при соответствующем выборе размеров проходных сечений достигают больших величин (порядка нескольких метров в секунду), тогда как скорости гидравлических приводов определяются часто производительностью насосного агрегата;

- по сравнению с электрическим приводом поступательного движения, развивающим те же усилия, пневмопривод значительно легче, дешевле и проще по конструкции.

Наиболее существенные недостатки устройств пневмоприводов:

- низкое быстродействие и дальное действие управляющего сигнала по сравнению с электроприводом. Если в электронике скорость передачи сигналов определяется скоростью распространения электромагнитных волн, то скорость передачи пневматических сигналов ограничивается скоростью звука. Дальное действие пневматических систем ограничивается расстояниями порядка нескольких сотен метров. При больших расстояниях необходимы промежуточные усилители либо иные специальные устройства;

- усилия, развиваемые пневматическим приводом, обычно меньше усилий, развиваемых гидравлическим приводом тех же размеров. Это связано с тем, что силовое давление воздуха в промышленных пневмосетях составляет обычно 0,4-0,6 МПа;

- не может с высокой точностью отслеживать входной сигнал по сравнению с гидроприводом. Это связано в первую очередь со сжимаемостью воздуха [1].

Пневмоприводы с поступательным движением выходного звена разделяют на поршневые, мембранные, сильфонные, камерные и шланговые. Наибольшее распространение получили поршневые пневмоприводы-пневмоцилиндры. Они используются в прессовом производстве, при выполнении погрузочно-разгрузочных работ, на линиях розлива и упаковки продуктов, в транспортных средствах, подъемниках и конвейерных системах, во всех отраслях производства [2].

Целевым назначением пневматических цилиндров является линейное передвижение рабочего элемента в станках и прочем оборудовании. Принцип действия пневмоцилиндра основан на использовании воздуха под давлением, за счет которого приводится в движение шток в полый гильзе. Возникает возвратно-поступательное воздействие на механизмы.

Основные неисправности в ходе эксплуатации пневмоцилиндров:

- износ внутренней поверхности гильзы
- нарушение уплотнений поршня и протечки на ходовых участках
- повреждение резьбовых соединений
- искривление штока и т.д.

Описание проблемы. Боковые нагрузки F_1 воздействуют на шток пневмоцилиндра по схеме рычага первого рода (Рис.1).

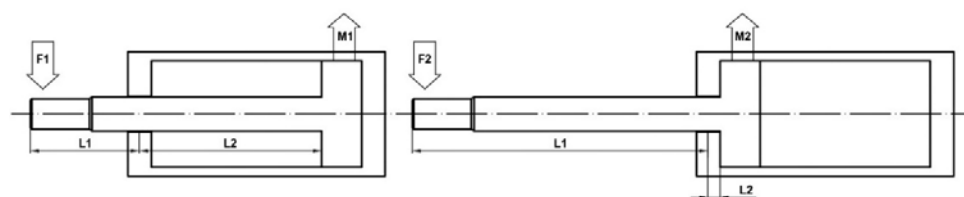


Рис. 1. Схема сил и моментов при вытянутом и максимально выдвинутом штоке

Исходя из формулы момента силы рычага, важнейшее значение имеет длина плеча рычага L_1 и L_2 (Рис.1).

$$M = F \cdot L.$$

Следовательно, при увеличении хода момент сил боковых нагрузок действующий на уплотнения, направляющие штока и уплотнения и изношенные элементы поршня возрастают кратно длине хода и приводят их к износу.

Наглядным примером служит информация о зависимости допустимых боковых нагрузках, приложенных к концу штока от длины хода, предоставляемая производителями пневмоцилиндров. Например, для серии C96 SMC диаметром 63 мм. зависимость выглядит так:

- 0 мм. – 100 Ньютонов (Н);
- 500 мм - <20 Н;
- 1000 мм - ≈ 10 Н;
- 1500 мм - ≈ 7 Н;
- 1900 мм - < 6 Н [3].

Это является критическим фактором для ресурса приводов с большими ходами. При интенсивной работе привода можно нередко наблюдать не только утрату изнашиваемых деталей, возможных к замене, но и износ на внутренней поверхности гильзы цилиндра и поверхности поршня. Это достаточно серьезная проблема, влекущая за собой выход из строя пневмоцилиндра. Внутреннее зеркало восстановлению не подлежит, и ремонт становится нецелесообразен. Ведущие производители пневмоцилиндров уделяют особое внимание к качеству трущихся поверхностей приводов. Их повышенный класс шероховатости напрямую влияет на такие параметры эксплуатации, как минимальное давление срабатывания, межремонтный период, энергоэффективность.

При больших боковых нагрузках применяются цилиндры с дополнительными направляющими, встроенными в единый корпус цилиндра, либо специальный узел направляющих для цилиндров ISO 6432, ISO 15552, ISO 6431. [4][5] Это значительно удорожает и усложняет конструкцию, увеличивает габариты и массу. Такие приводы не отличаются «гигиеническим» дизайном конструкции (максимально гладкие поверхности оборудования без лишних элементов, позволяющие эффективно производить санитарную обработку оборудования). Что является важным требованием в пищевом, косметическом и фармацевтическом производствах. Кроме того, они имеют существенное ограничение по длине хода, стандартно до 500 мм. [5]

В стандартных сериях пневмоцилиндров производители вынуждены увеличивать длину направляющих штока и поршня с увеличением типоразмеров и, соответственно, расчетных нагрузок. В таблице 1 представлена тенденция изменения конструктивных размеров под направляющие штока и поршня с увеличением типоразмера стандартного пневмоцилиндра по ISO 15552 ведущих производителей. [6][7][8]

Таблица 1

Зависимость длин опоры штока и поршня от диаметра поршня, мм

Типоразмер цилиндра		32	40	50	63	80	100
SMC C96	Длина крышки (G)	28,9	32,6	32	38,6	38,4	42,9
	Базовая длина корпуса цилиндра (L8+)	94	105	106	121	128	138
Camozzi Серия 60	Длина крышки (N)	26	29	29,5	36,5	36	38,5
	Базовая длина корпуса цилиндра (L2+)	94	105	106	121	128	138
Festo DSBG	Длина крышки (G)	28	33	33	40,5	43	48
	Базовая длина корпуса цилиндра (L8+)	94	105	106	121	128	138

Таким образом, повышение износостойкости боковым нагрузкам наиболее дорогостоящих частей пневмоцилиндра- гильзы и поршня является актуальной задачей.

Предлагаемое решение. В качестве дополнительной защиты от износа вследствие воздействия боковых нагрузок, предлагается конструктивное изменение: перенос стяжных шпилек крышек цилиндра во внутреннюю часть гильзы для цилиндров со стяжными шпильками (стандарт ISO 15552, ISO 6432) или замена резьбового крепления гильза- крышка (серии CG1,CG3,CG5 SMC), вальцовочного соединения гильза-крышка (стандарт ISO 6431) на соединение стяжными шпильками во внутренней части гильзы (Рис.2).

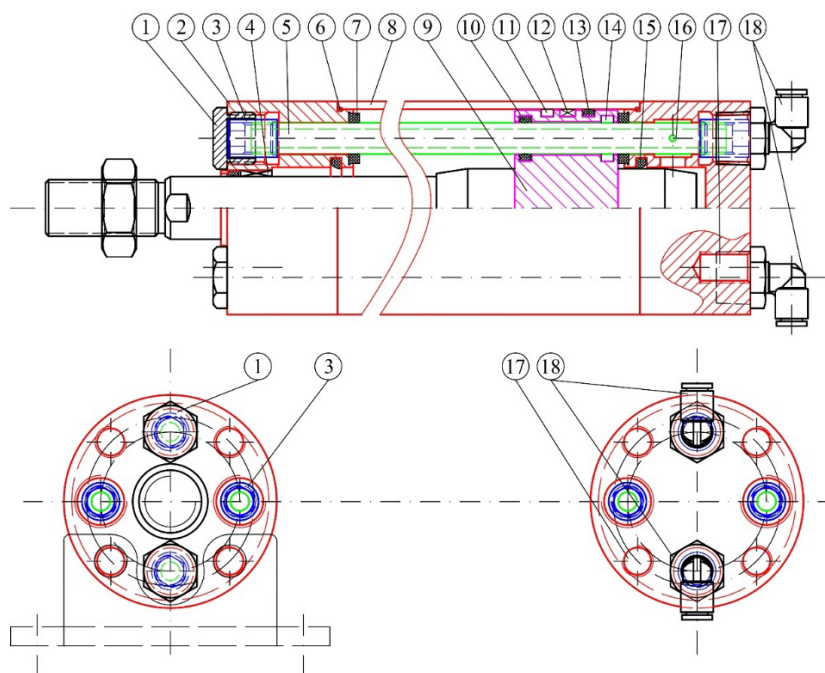


Рис. 2 Предлагаемая конструкция цилиндра со стяжными шпильками.
 1-Заглушка порта M16, 2-Передняя крышка, 3-Гайка стяжной шпильки M10, 4-Направляющая штока цилиндра, 5-Стяжная шпилька-трубка, 6-Уплотнение крышка-гильза, 7-Упругий демпфер, 8-Гильза цилиндра, 9-Поршень, 10-Уплотнение поршень-шпилька, 11-Износное кольцо поршень-гильза, 12-Магнитное кольцо, 13-Уплотнение поршень-гильза, 14-Износное кольцо поршень-шпилька, 15-Демпфирующее уплотнение, 16-Отверстие шпильки-трубки, 17-Крепежная резьба M10, 18-Угловой поворотный фитинг порта цилиндра

Повышение качественных показателей привода. Поршень получает дополнительную опору и направляющие, что надежнее стабилизирует его по всей длине и особенно в крайне выдвинутом положении. Предлагаемая конструкция имеет преимущество перед стандартной при исполнении приводов с длинным ходом, т.к. боковые нагрузки равномерно распределяются на симметрично расположенные направляющие шпильки помимо поверхности гильзы. Это дополнительно предотвращает перекос поршня и износ цилиндра. Поршень оборудуется стандартными уплотнениями и износными направляющими кольцами в зоне контакта со шпильками (Рис.2 п.п.10,14), которые установлены на противоположных поверхностях относительно уплотнений и направляющих колец поршень-цилиндр (Рис.2 п.п.11,13). Это эффективно использует длину поршня для противодействия боковым нагрузкам.

Для расчета теоретического усилия цилиндра с предлагаемой конструкцией возьмем цилиндр с диаметром поршня 63 мм и проведем сравнение со стандартным цилиндром CG1-Z SMC.

Расчет площади поршня и теоретического усилия цилиндра предлагаемой конструкции. Теоретическое усилие – одна из основных характеристик, необходимых для подбора привода. Указывается во всех каталогах серий пневмоцилиндров в виде двух различных значений для втягивания и выдвигания штока, поскольку при втягивании давление сжатого воздуха воздействует на меньшую площадь поршня.

Так же может быть рассчитано по формуле [9]:

$$F=S \cdot P=\pi/4 \cdot D^2 \cdot P,$$

S-площадь сечения поршня (мм²); D-диаметр поршня (мм); P-давление сжатого воздуха (МПа).

Для удобства подбора привода рассчитываются теоретические усилия при разных давлениях.

Полная площадь стандартного поршня диаметром 63 мм составляет 3117 мм². [6] Учитывается в расчетах на выдвигание. Площадь поршня для расчетов на втягивание уменьшена с учетом площади сечения штока и составляет 2803 мм². [6]

В расчете для цилиндра предлагаемой конструкции необходимо учесть площадь сечения стяжных шпилек-трубок диаметром 10 мм, в количестве 4 шт.

$$\begin{aligned} S &= \pi r^2 = 3,14 \cdot 5^2 = 78,5 \text{ мм}^2 \\ 4 \text{ шт. } S &= 4 \cdot 78,5 \text{ мм}^2 = 314 \text{ мм}^2 \\ 3117 - 314 &= 2803 \text{ мм}^2 \\ 2803 - 314 &= 2489 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

Уменьшение площади, а следовательно, и теоретического усилия составляет 10,1% для выдвигания и 11,2% для втягивания. Это уменьшение перекрывается минимальным 25% запасом теоретического усилия при подборе цилиндра под конкретную задачу. Либо может быть легко компенсировано небольшим увеличением давления.

Расчет боковой нагрузки. Стандартно предельно допустимая боковая нагрузка на полностью выдвинутый шток цилиндра рассчитывается по формуле [10]:

$$Fr = L1 \cdot Fb / (L1 + L2 + \text{Ход штока}),$$

Fr – предельно допустимая нагрузка (Н); $L1$ – расстояние от центра направляющей втулки штока в передней крышке до центра износного кольца поршня (опоры шток-гильза) (мм); Fb – максимальная нагрузка на направляющую втулку штока передней крышки (Н); $L2$ – расстояние от центра направляющей втулки штока в передней крышке до конца штока (мм)

В свою очередь, максимальная нагрузка на направляющую втулку находится по формуле [10]:

$$Fb = F / k,$$

F – максимальное теоретическое усилие (Н); k – коэффициент равный 40 для диаметров поршня от 4 до 10 мм, 20 от 12 до 100 мм.

В нашем случае расчет предельно допустимой боковой нагрузки состоит из суммы двух значений: стандартное значение (шток-поршень-гильза) и расчета нагрузки для шпилек (шток-поршень-шпильки) по схеме рисунка 3.

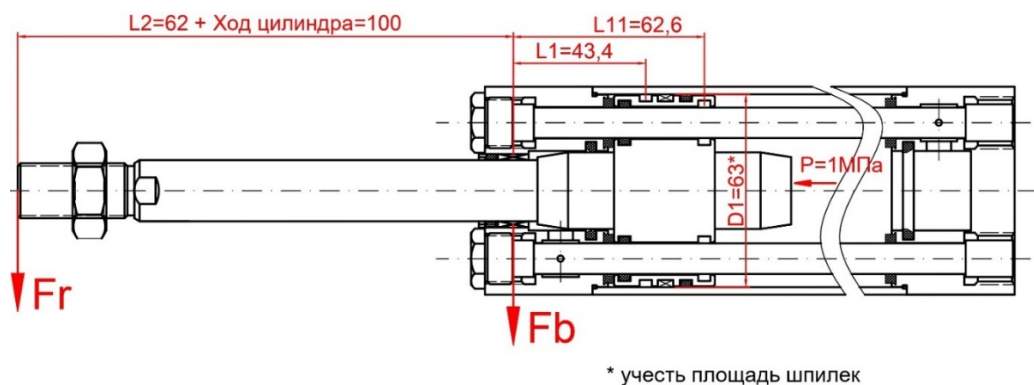


Рис. 3. Схема приложения сил и размеров

Для расчета возьмем цилиндр с размером хода 100 мм и диаметром поршня 63 мм.

Рассчитаем стандартное значение предельной боковой нагрузки:

$$F = S \cdot P = 2803 \cdot 1 = 2803 \text{ Н}$$

$$Fb = F / k = 2803 / 20 = 140 \text{ Н}$$

$$Fr = L1 \cdot Fb / (L1 + L2 + \text{Ход штока}) = 43,4 \cdot 140 / (43,4 + 62 + 100) = 29,6 \text{ Н}$$

Рассчитаем значение предельной боковой нагрузки для шпилек:

$$Fr = L11 \cdot Fb / (L11 + L2 + \text{Ход штока}) = 2,6 \cdot 140 / (62,6 + 62 + 100) = 39 \text{ Н}$$

Сумма значений составляет $\sum Fr = 68,6 \text{ Н}$.

Для сравнения, значение предельно допустимой нагрузки для круглого цилиндра CG1-Z SMC диаметром 63 мм. и ходом 100 мм. составляет около 25 Н. [11]

Вывод: предлагаемая конструкция более чем в 2,5 раза повышает предельно допустимые боковые нагрузки по сравнению со стандартной конструкцией привода.

Предлагается оригинальное решение использовать в качестве стяжных шпилек трубку. Функционал данного решения:

- Две из четырех шпилек-трубок использовать в качестве каналов подачи/отвода сжатого воздуха. Аксиально расположить порты цилиндра через переднюю или заднюю крышку на выбор (Рис.2, п.18) с установкой заглушек на противоположных концах (Рис.2, п.1).

- Задействовать оставшиеся две шпильки-трубки для внутреннего монтажа датчиков опроса положения, что защитит их от внешних воздействий, повысит «гигиенические» качества дизайна привода.

Это решение избавит от необходимости изготовления портов в крышках цилиндра и внешнего профиля для установки датчиков опроса положения.

Цилиндр получает непроворотный шток по умолчанию, а не опционально, т.к. шпильки, установленные внутри поршня исключают вращение штока. Это свойство имеет важное значение для ряда технологических операций (позиционирование, перемещение объектов и т.д.) При этом для реализации на стандартных цилиндрах используется шестигранный шток, уплотнения и направляющие. В предлагаемой конструкции все уплотнения имеют круглую форму, что является более технологичным и дешевым решением. [12].

Предлагаемая конструкция имеет меньшую массу по сравнению с круглыми цилиндрами со стяжными шпильками и профильными цилиндрами со стяжными шпильками, поскольку отсутствуют массивные элементы крышек под внешнюю установку шпилек и профильные элементы для установки датчиков положения на корпусе гильзы.

В предлагаемой конструкции сохранено наряду с упругим демпфированием и пневматическое демпфирование (Рис.4).

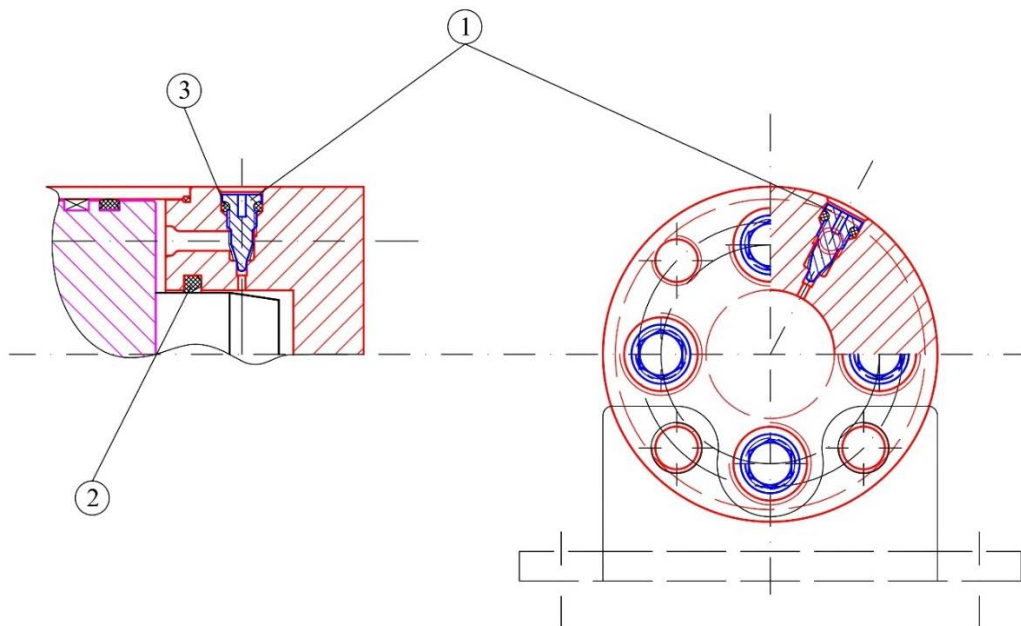


Рис. 4. Конструкция пневматического демпфирования: 1 - пневматический демпфер; 2 - демпфирующее уплотнение; 3 - уплотнение иглы

Расчет шпильки-трубки на необходимую прочность. Диаметр стяжной шпильки-трубки для цилиндра типоразмера 63 мм подобран в 10 мм. наружного диаметра под резьбу М10 и внутренним диаметром 6мм, исходя из габаритов стандартных датчиков опроса положения круглого сечения 4 мм с осевым кабельным вводом для их возможного размещения внутри. Например, серия D-M9/D-A9 SMC. [13]

При расчете необходимо учесть силы, действующие на шпильку-трубку: осевое усилие при затяжке и теоретическое усилие, действующее разнонаправленно на крышку и поршень. Давление сжатого воздуха, проходящего через шпильку-трубку, в расчетах не учитываем по причине незначительного воздействия.

Осевое усилие при затяжке получаем по формуле:

$$F = T / K * d \quad (H),$$

где Т –момент затяжки (Н*м), для цилиндра типоразмера 63 мм составляет 12,1 Н*м [3]; К - константа, зависящая от материала и размера; d - номинальный диаметр (м)

$$F = 12,1 / 0,2 * 0,01 = 6050 \text{ Н.}$$

Максимальное теоретическое усилие (при максимальном рабочем давлении 1 МПа) действующее на 1 шпильку-трубку составляет $2803/4 = 700 \text{ Н.}$

Сумма сил, действующих на шпильку-трубку составляет $6050 + 700 = 6750 \text{ Н.}$

Для удобства воспользуемся готовыми расчетами на разрушающее усилие болтов и шпилек по площади сечения для М10 с учетом площади отверстия шпильки-трубки 6 мм:

$$S_{M10} = 58 \text{ мм}^2$$

$$S_{отв.} = \pi * R^2 = 28,26 \text{ мм}^2$$

$$S_{ш} = S_{M10} - S_{отв.} = 58 - 28,26 = 29,74 \text{ мм}^2$$

Это значение находится между значениями площади сечения М7 (28,9) и М8 (36,6).

Определим подходящий предел прочности по двукратной сумме сил, действующих на шпильку-трубку из значений для М7:

$$2 * 6750 = 13500 \text{ Н} \quad - \text{ближайшие классы прочности } 5.6; 5.8; 6.8; 8.8$$

Материал: углеродистая сталь; сталь с покрытием — электролитическое (гальваническое) оцинкование, термодиффузионное оцинкование; марки стали — 10кп, 20кп, 10, 20, 35, 20Г2Р, 40Х, 30ХР. [14]

Вывод: расчет подтверждает возможность реализации предлагаемой конструкции привода с применением общепромышленных материалов, не повышающих стоимость изделия.

«Гигиенический» дизайн. Поскольку все конструктивные элементы, способные накапливать на своей поверхности пыль, технологические загрязнения и отходы убраны (шпильки), расположены на аксиальных плоскостях (порты пневматического присоединения), то основная поверхность, имеющая форму гладкого цилиндра легко подвергается чистке и санитарной обработке (Рис.5).

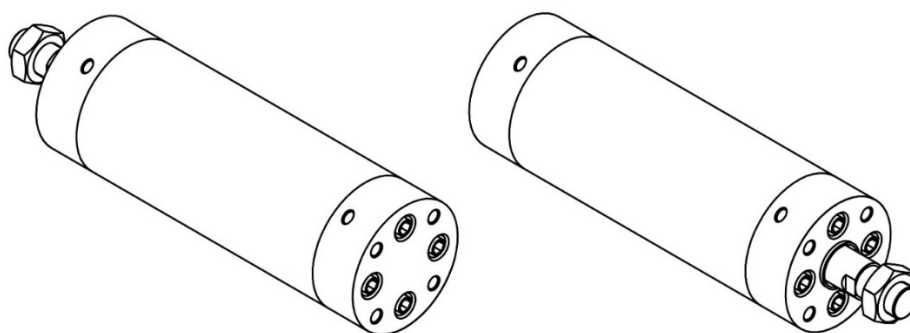


Рис. 5. Внешний вид

Отверстия пневматических демпферов легко могут быть закрыты стандартными пластиковыми заглушками.

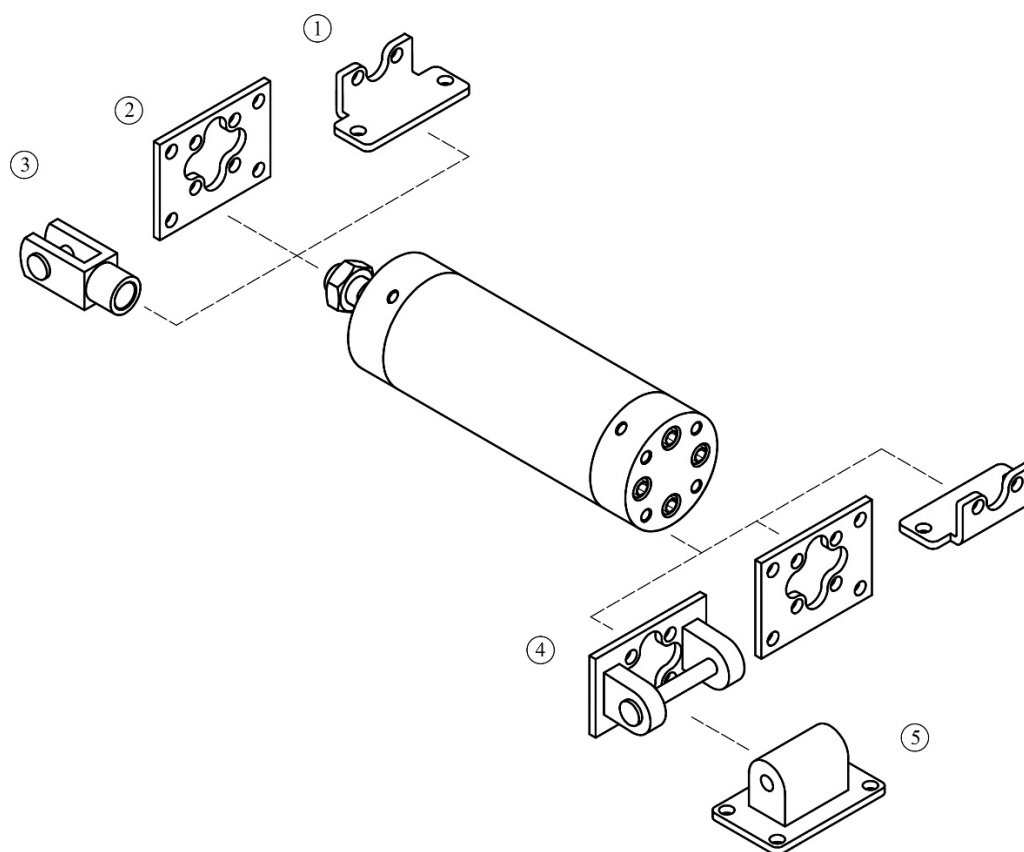


Рис. 6. Монтажные элементы: 1 – лапа; 2 – фланец; 3 - наконечник-вилка; 4 - двойная проушина; 5 - одинарная проушина

Необходимо отметить, что выпускаемые на сегодняшний день круглые цилиндры подразделяются на два основных типа: разборные и неразборные.

Разборные цилиндры имеют резьбовое соединение гильза-крышка. Для типоразмеров с большим диаметром это вызывает определенные сложности при сборке-разборке и обеспечении герметичности (серии CG1, CG3, CG5 SMC; PVBA Pemaks).

Неразборные цилиндры (с завальцованной гильзой, серии C85, C76 SMC; 16,19,23,24,25 Camozzi; DSNU, ESNU, DSG Festo) являются не ремонтпригодными и при выходе из строя подлежат замене.

Предлагаемая конструкция в этом аспекте имеет преимущество, поскольку сохраняет простоту сборки-разборки, обеспечивает гарантированную герметичность с помощью простых кольцевых уплотнений (Рис.2 п.6) и не требует специальных средств и инструмента.

Монтажные элементы для корпуса и поршневого штока. В зависимости от выполняемой задачи, предлагаемая конструкция цилиндра может быть оснащена различными комбинациями монтажных элементов.

Наряду с представленными элементами на рисунке 6 на цилиндр могут быть установлены: шарнирный наконечник, шаровый шарнир, поворотная цапфа, опорная стойка, опорная стойка с шаровым шарниром, проушины с шаровым шарниром по аналогу монтажных элементов серии C/CP96 ISO-15552 SMC. [6]

Вывод. Предлагаемое оригинальное решение значительно улучшает важные качественные показатели пневматических цилиндров, расширяет их возможности, особенно в исполнении с длинным ходом. А именно:

- повышенное сопротивление к боковым нагрузкам и силам кручения;
- повышенная точность (уменьшенное отклонение по углу);
- аксиальное расположение портов;
- внутренний монтаж датчиков положения;
- неповоротный шток в базовом исполнении, а не опционально;
- «гигиенический» дизайн корпуса.

Решение является технологичным. Операции по доработке конструкции поршня компенсируются отсутствием необходимости изготовления портов в крышках цилиндра. Таким образом, трудозатраты на изготовление цилиндров не увеличиваются, а качественные показатели значительно улучшаются.

Список литературы

1. Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г. Основы пневмоавтоматики. М., Машиностроение, 1973. 360 с.
2. Королев В.А., Стажков С.М. Элементы пневматического привода: учебное пособие. Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2020. 57 с.
3. SMC Corporation: Техническая информация: официальный сайт. Токио. [Электронный ресурс] URL: <https://www.smcworld.com/upfiles/manual/en-jp/files/C96-E.pdf> (дата обращения: 19.11.2024).
4. ЭС ЭМ СИ Пневматик: Техническая информация: официальный сайт. Санкт-Петербург. [Электронный ресурс] URL: <https://www.smc.eu/ru-ru/products/privody-s-%20napralyauschi-mi~17136~nav#s> (дата обращения: 10.11.2024).

5. Индустриальные технологии : Техническая информация: официальный сайт. Санкт-Петербург. [Электронный ресурс] URL: https://catalog.pneumoindutech.ru/?url=tree-lvl3_PP-0338 (дата обращения: 12.11.2024).

6. ЭС ЭМ СИ Пневматик: Техническая информация: официальный сайт. Санкт-Петербург. [Электронный ресурс] URL: https://content2.smcetech.com/pdf/C96_air%20cushion_RU.pdf (дата обращения: 10.11.2024).

7. Камоцци Пневматика: Техническая информация: официальный сайт. Москва. [Электронный ресурс] URL: <https://catalog.camozzi.ru/#!d01g01s65p01> (дата обращения: 10.11.2024).

8. Фесто-РФ: Техническая информация: официальный сайт. Москва. [Электронный ресурс] URL: https://ftp.festo.com/Public/PNEUMATIC/SOFTWARE_SERVICE/Documentation/2023/RU/DSBG-160_RU.PDF (дата обращения: 10.11.2024).

9. Международные курсы. Пневмоавтоматика. Учебное пособие. СПб., ЭС ЭМ СИ Пневматик, 2013. 176 с.

10. SMC Corporation: Руководство по эксплуатации: официальный сайт. Токио. [Электронный ресурс] URL: <https://www.smcworld.com/upfiles/manual/en-jp/files/CQ2x-OM0002M.pdf>. (дата обращения: 19.11.2024).

11. SMC Corporation: Руководство по эксплуатации: официальный сайт. Токио. [Электронный ресурс] URL: <https://www.smcworld.com/upfiles/manual/en-jp/files/CG1-Z-E.pdf> (дата обращения: 19.11.2024).

[12] Попов, Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов в области техники и технологии. М., МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2001. 320 с.

13. ЭС ЭМ СИ Пневматик: Техническая информация: официальный сайт. Санкт-Петербург. [Электронный ресурс] URL: <https://www.smc.eu/ru-ru/products/pryamoj-montazh~75353~nav#s> (дата обращения: 10.11.2024).

14. ГОСТ 7805-70. Болты с шестигранной головкой класса точности А. Конструкция и размеры = Hexagon bolts, product grade A. Construction and dimensions: Межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР от 04 марта 1970 г. № 270 / разработан Министерством черной металлургии СССР. Москва: Стандартинформ, 2010. V. 43.

Костенко Андрей Владимирович, инженер, red30uk09tor@bk.ru, Россия, Красноярск, ООО "ЭС ЭМ СИ Пневматик"

*A METHOD FOR IMPROVING THE QUALITY OF A LINEAR PNEUMATIC ACTUATOR
BY MAKING ORIGINAL DESIGN CHANGES*

A.V. Kostenko

The intended purpose of pneumatic cylinders is the linear displacement of the working element in machine tools and other equipment. Lateral loads affect the piston rod of the pneumatic cylinder according to the lever scheme of the first kind. Consequently, as the stroke increases, the lateral loads on the seals and guides of the rod and piston increase in multiples of the stroke length and lead to wear. This is a critical factor for the life of high-stroke drives. During intensive operation of the drive, it is often possible to observe not only the loss of wear parts, but also wear on the inner surface of the cylinder liner and the piston surface. This is a rather serious problem, which entails the failure of the pneumatic cylinder. To date, manufacturers are increasing the length of the piston to solve this problem, and under heavy lateral loads they are forced to use cylinders with additional guides, etc. This significantly increases the cost and complexity of the design, increases dimensions and weight. A constructive modification of the pneumatic cylinder is proposed: the transfer of the coupling pins of the cylinder caps to the inner part of the sleeve. The proposed original solution significantly improves the important quality indicators of pneumatic cylinders, expands their capabilities in long-stroke design. Namely: increased resistance to lateral loads and torsional forces; increased accuracy (reduced angle deviation); axial arrangement of ports; internal mounting of position sensors; non-rotating rod in the basic version, not optional; "hygienic" design of the housing.

Key words: pneumatic actuator, pneumatic cylinder, non-rotating rod, lateral load, cylinder liner wear.

Kostenko Andrey Vladimirovich, engineer, red30uk09tor@bk.ru, Russia, Krasnoyarsk, LLC "SMC Pnevumatic"

УДК 65.07 67.03

DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-375-376

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННОГО СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «ВЕДОМОЕ КОЛЕСО» МАСЛЯНОГО НАСОСА

В.Б. Масягин, С.Б. Скобелев, Д.А. Ерофеев, Е.А. Ерофеев

В статье представлен технологический процесс механической обработки полученного ранее слоистого композиционного материала анизотропного армирования, состоящий из трех операций – фрезерования, токарной обработки и зубофрезерования. Приведены рациональные режимы обработки на каждой операции согласно рекомендациям для механической обработки композиционных материалов, указаны дефекты, возникающие в процессе обработки. Несмотря на наличие дефекта разломачивания, присущего для композитов, армированных стекловолокном (стеклотканью), были достигнуты все показатели точности и качества поверхности зубьев детали «Ведомое колесо»

Ключевые слова: композиционный материал, узел масляного насоса, зубчатое колесо, смазочно-охлаждающая жидкость, блок шестерен, фрезерование, зубофрезерование, токарная обработка.

Узел масляного насоса (УМН) применяется для подачи смазывающей жидкости в узлы и агрегаты круглошлифовального станка RIBON RU-100. В данном оборудовании применяется циркуляционная система

смазки, то есть смазочный материал в виде масла или жидкости на масляной основе бесперебойно подаётся к соответствующим органам станка при помощи масляного насоса смазки и, пройдя определённый путь в системе, возвращается в резервуар – масляный бак (рис. 1) [1]. Масляный насос, применяемый для подачи смазывающей жидкости в камеру подшипников шпинделя шлифовальной бабки, осуществляет забор масла из общей ёмкости смазывающей системы.

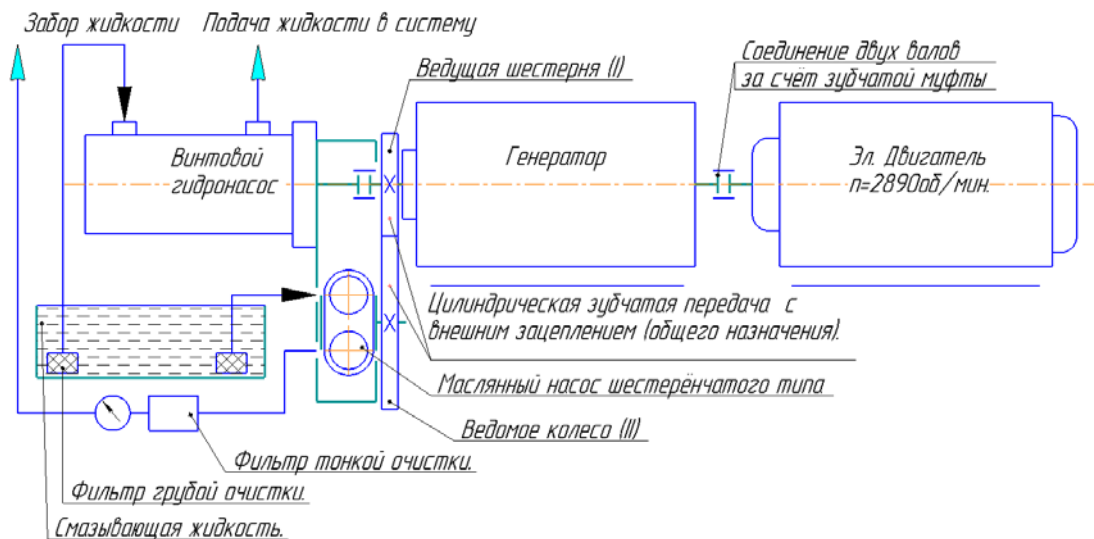


Рис. 1. Схема подачи смазывающей жидкости круглошлифовального станка

УМН получает вращательное движение от общего вала эл. двигателя за счёт зубчатой передачи от ведущей шестерни к ведомому колесу (рис. 1), что, в свою очередь, исключает задействование отдельного электрического двигателя, обеспечивая при этом полное правильное зубчатое зацепление и лёгкую работу УМН. Установлено, что наиболее частой причиной выхода из строя узла является износ зубчатого венца ведомого колеса, которое изготовлено из текстолита марки ПТК – поделочный текстолит конструкционный горячего прессования, ГОСТ 5-78 [2].

При проведении ремонта блока шестерен необходимо заменить ведомое колесо, изготовив его из слоистого композиционного материала анизотропного армирования, применение которого позволит повысить долговечность работы детали «Ведомое колесо» в узле масляного насоса [3, 4].

Технологический процесс механической обработки ведомого колеса (рис. 2) состоял из трех операций:

1. Предварительная обработка – фрезерование;
2. Токарная обработка;
3. Зубофрезерование.

Операция предварительной обработки выполнялась на фрезерном универсальном станке FUS 32. Фрезеровались габаритные размеры, обрабатывалась поверхность заготовки с соблюдением допусков формы

и допусков расположения поверхностей. В качестве инструмента использовалась фреза концевая с коническим хвостовиком 2223-0021 ГОСТ 17026-71, Ø45×63×188; Z-6.

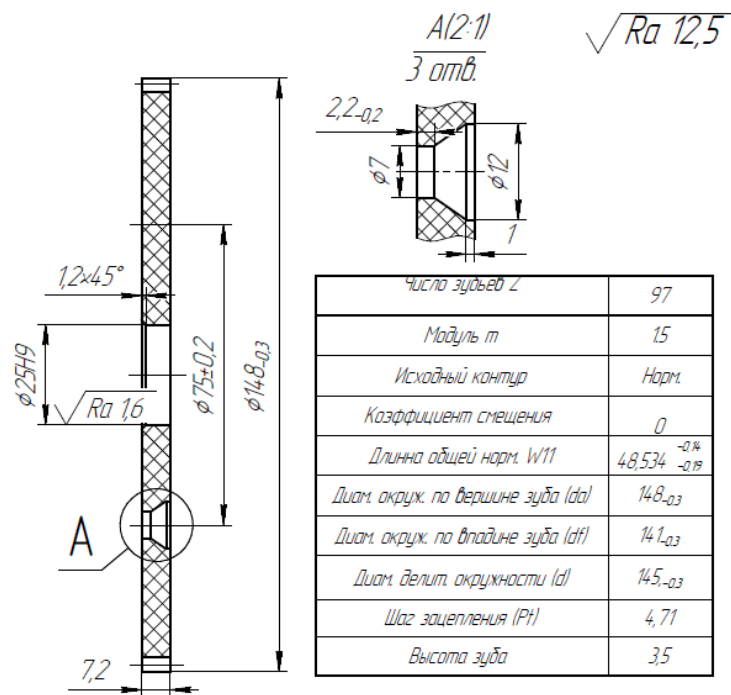


Рис. 2. Чертеж детали «Колесо ведомое»

Согласно рекомендациям по механической обработке стеклотекстолитов [5, 6] применялся вид обработки – фрезерование встречное, способствующее снижению расслаивания, разломачивания и вырывания отдельных элементов. Применялась фреза большего диаметра (45 мм), чем при обработке металлов, из-за меньших усилий резания. Обработка производилась при следующих режимах: скорость резания $V = 90$ м/мин, частота вращения шпинделя $n = 630$ об/мин, глубина резания t до 3 мм. (чистовой проход), подача минутная $S_{мин} = 382 \div 400$ мм/мин, подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб.

Ввиду применения встречного фрезерования за счёт повышенной концентрации связующего элемента (клеевой состав) разломачиваемость стеклоткани и стеклосетки была снижена до минимума.

Недостатком при фрезеровании изготовленного композиционного материала является повышенный износ режущей кромки инструмента (рис. 3) по причине повышенного содержания в материале заготовки армирующего наполнения – стеклоткани, стеклосетки, отверждённого клеевого состава.

Операция токарной обработки выполнялась на токарно-винторезном станке 1К62. В качестве приспособления применялась планшайба с целью обработки заготовки за один проход без переустановки с поджатием задним центровочным конусом (рис. 4). Заготовкой являлся квадрат с размерами 160×160 мм, полученный после операции фрезерова-

ния. Производилось продольное черновое точение (обдирка) с ударными нагрузками – заготовка обрабатывалась до размера $\varnothing 152$ мм, и продольное чистовое точение – заготовка обрабатывалась до размера $\varnothing 148,5$ мм. В качестве инструмента использовался резец токарный проходной упорный 2103-0021 BK4 ГОСТ 18879-73.



Рис. 3. Износ режущей кромки инструмента после фрезерования



Рис. 4. Приспособление для токарной обработки – планшайба с поджатием задним центром

Обработка производилась при следующих режимах, согласно рекомендациям [5 – 7]: скорость резания $V = 200$ м/мин, частота вращения шпинделя $n = 400$ об/мин, глубина резания: t до 3 мм (чистовой проход для подчистки), подача $S = 0,1$ мм/об.

В результате токарной обработки композиционного материала установлено, что произошло разломачивание армирующего элемента конструкции (рис. 4).

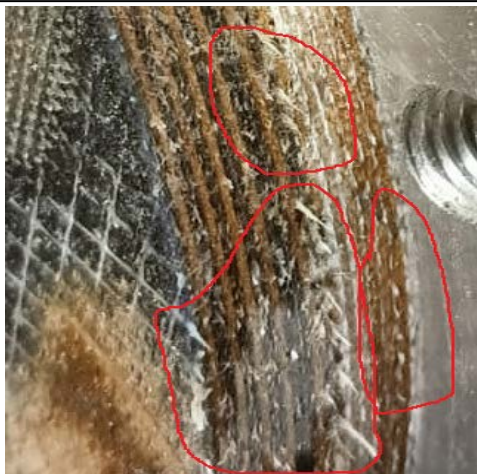


Рис. 4. Разлохмачивание армирующего материала

В данном случае разлохмачивание не несло отрицательных последствий, так как операция являлась промежуточной и чистовое подрезание армирующего волокна не требовалось. Также отсутствовал износ режущей кромки инструмента и отсутствовало налипание и образование нароста на инструменте в следствие невысокой температуры в зоне обработки и низкой скорости резания.

Операция зубофрезерования выполнялась на зубофрезерном вертикальном полуавтомате модели 5К310. Производилось фрезерование зубчатого венца ведомого колеса методом обкатки при радиальном врезании инструмента и тангенциальной подаче заготовки. Обработка осуществлялась за один рабочий ход. Инструментом являлась фреза червячная модульная М 1,5 20° 63х27х50 2510-4134 ГОСТ 9324-80.

Согласно рекомендациям [5, 6] для нарезания зубьев зубчатых колес, изготовленных из композиционных материалов, применялись следующие режимы обработки: скорость резания $V=46$ м/мин, частота вращения шпинделя $n=100$ об/мин, частота вращения заготовки: $n_3=7,24$ об/мин, глубина резания t до 3мм (чистовой проход окончательный), подача $S=0,1$ мм/за один оборот стола.

Операция зубофрезерования применялась к двум видам композиционных материалов одновременно (рис. 5).

В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применялась СОЖ на масляной основе по причине того, что обработка таких материалов как стеклотекстолит, текстолит и других пылевывделяющих матричных составов сопровождается обильным выделением тонкой хлопчатобумажной и стеклянной пыли, а обработка с охлаждающей жидкостью на масляной основе сводит образование пыли к минимуму. Также масляное охлаждение инструмента исключает возможность «разбухания» внутренней конструкции некоторых отдельных обрабатываемых композиционных материалов, таких как ДСП, ЛДСП, МДФ.

В результате операции зубофрезерования установлено, что для обрабатываемого композитного материала (рис. 6, II) произведена обработка всех зубьев зубчатого венца, «вырывов», недорезов, разлохмачивания ар-

мирующего материала не наблюдалось. Применение обильного смазывания в процессе обработки исключило пылевыведение полностью, вспучивание внутренней конструкции отсутствует.

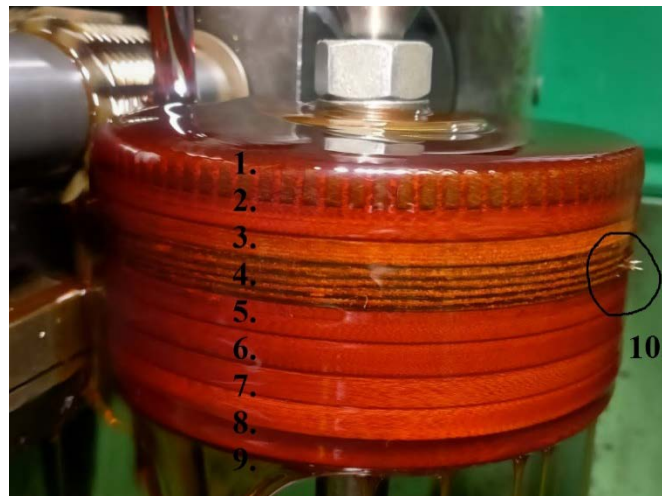


Рис. 5. Операция зубофрезерования: 1, 2 – Текстолит марки ПТК на хлопчатобумажной основе, сорт высший; 5 – 9 – Текстолит марки «ПТК» на хлопчатобумажной основе, сорт первый; 10 – разлохмачивание армирующего наполнения после предварительной обработки

При обработке текстолита первого сорта на основе хлопчатобумажного тканевого наполнителя (рис. 6, III), образовалось значительное разлохмачивание кромки зуба. Что не наблюдалось на участке I – текстолите высшего сорта и участке II – разработанном композитном материале.

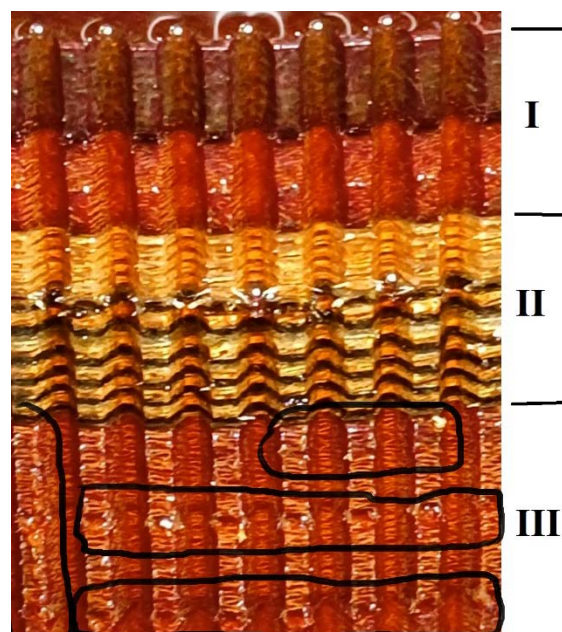


Рис. 6. Фрезерование зубьев на разных видах композиционных материалов: I – текстолит высшего сорта; II – разработанный композиционный материал; III – текстолит первого сорта

Также при фрезеровании разрабатываемого композиционного материала наблюдался износ режущей кромки инструмента (рис. 7) из-за наличия в материале наполнителя в виде стеклоткани и стеклосетки.

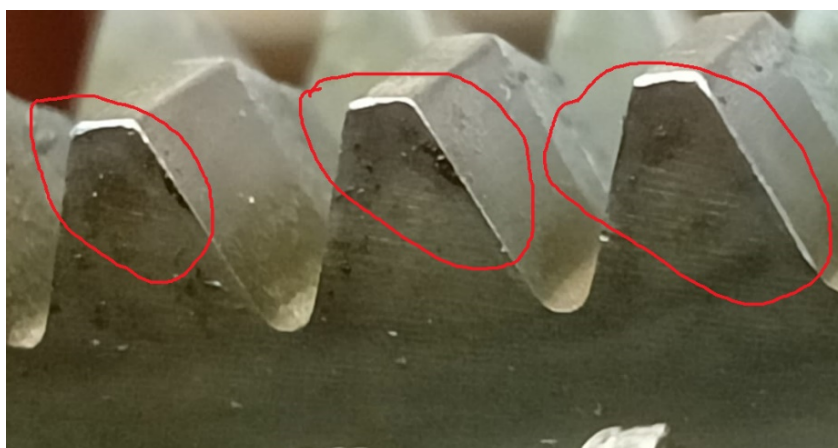


Рис. 7. Износ режущей кромки червячно-модульной фрезы при зубофрезеровании композиционного материала

Зубчатые колеса, изготовленные из слоистого композиционного материала, не подвергались отделочной обработке – шлифованию или доводке. При этом, несмотря на наличие дефекта разлохмачивания [8], присущего для композитов, армированных стекловолокном (стеклотканью), были достигнуты все показатели точности и качества поверхности зубьев (рис. 8).



Рис. 8. Ведомое колесо из композиционного материала ($h=5$ и 8 мм)

Таким образом, для проведения экспериментальных исследований были изготовлены два варианта детали «Ведомое колесо» – шириной 8 мм и 5 мм. (рис. 8). Обе детали соответствуют параметрам рабочего чертежа (рис. 2). Дальнейшие исследования будут направлены на оценку работоспособности полученных деталей в узле масляного насоса круглошлифовального станка Ribon RU-100.

Список литературы:

1. Кучер А.М., Киватицкий М.М., Покровский А.А. Металлорежущие станки (альбом общих видов, кинематических схем и узлов. М.: «Машиностроение». 1972. 308 с.
2. ГОСТ 5-78. Текстолит и асботекстолит конструкционные. Технические условия. М.: Издательство стандартов. 1992. 28 с.
3. Изготовление слоистого композитного материала методом склеивания, на основе винилового полимера (органическое стекло), армированного синтетическим волокном (полимерная сетка) / Д. А. Ерофеев, Е. А. Ерофеев, Л. В. Кононенко, А. А. Капран // EUROPEAN RESEARCH : сборник статей XXXI Международной научно-практической конференции, Пенза, 27 марта 2021 года. Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2021. С. 109-121. EDN HNEKUF.
4. Potential of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites in Sandwich Structures: A Review on Its Mechanical Properties. / S. Alsubari, M. Y. M. Zuhri, S. M. Sapuan, M. R. Ishak, R. A. Ilyas, M. R. M. Asyraf. // Polymers, January 2021.
5. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием. М.: Машиностроение. 1974. 192 с.
6. Штучный Б.П. Обработка пластмасс резанием: Справ. пособие. М.: Машиностроение. 1974. 145 с.
7. Гапонкин В.А. Обработка резанием. Металлорежущий инструмент и станки. М.: Машиностроение. 1990. 448 с.
8. Определение рациональных режимов механической обработки матричных композитных материалов на основе полимерных лакокрасочных составляющих / В.Б. Масыгин, С.Б. Скобелев, Е.А. Ерофеев, Д.А. Ерофеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 446-450. DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-446-447. EDN OASCCE.

Масыгин Василий Борисович, канд. техн. наук, профессор, masaginvb@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Скобелев Станислав Борисович, канд. техн. наук, доцент, skobelev@rambler.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Ерофеев Денис Александрович, аспирант, den-is.erofeev.77@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Ерофеев Евгений Александрович, аспирант, ewgen_77@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

MECHANICAL PROCESSING OF STRUCTURAL LAYERED COMPOSITE MATERIAL
FOR MANUFACTURING THE "DRIVE WHEEL" PART OF AN OIL PUMP

V.B. Masyagin, S.B. Skobelev, D.A. Erofeev, E.A. Erofeev

The article presents the technological process of mechanical processing of the previously obtained layered composite material with anisotropic reinforcement, consisting of three operations - milling, turning and gear hobbing. Rational processing modes are given for each operation according to the recommendations for mechanical processing of composite materials, and defects that arise during the processing are indicated. Despite the presence of a fraying defect inherent in composites reinforced with fiberglass (glass fabric), all indicators of accuracy and quality of the surface of the teeth of the "Driven wheel" part were achieved.

Key words: composite material, oil pump unit, gear wheel, cutting fluid, gear block, milling, gear hobbing, turning.

Masyagin Vasiliy Borisovich, candidate of technical sciences, docent, masaginvb@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Skobelev Stanislav Borisovich, candidate of technical sciences, docent, skobelew@rambler.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Erofeev Denis Alexandrovich, postgraduate, denis.erofeev.77@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Erofeev Yevgeniy Alexandrovich, postgraduate, ewgen_77@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 621.313.333.2; 681.5.09; 519.711.3; 532.542.1
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-384-385

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО АСИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОГО АГРЕГАТА В СОСТАВЕ
ОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕКТА**

Г.И. Однокопылов, А.Н. Гаврилин, А.Д. Брагин, И.А. Розаев

В статье представлено исследование отказоустойчивого управления асинхронным электроприводом насосного агрегата системы охлаждения опасного производственного объекта при обрыве фазы статора. Применение отказоустойчивого управления целесообразно для отраслей промышленного производства, где отказ асинхронного электропривода в составе насосного агрегата может привести к аварийной ситуации с катастрофическими последствиями с большим экономическим ущербом и существенными экологическими последствиями. Отказоустойчивое управление строится на основе разрабатываемых алгоритмов отказоустойчивого управления и их проверку целесообразно проводить на основе методов математического и имитационного моделирования. Разработана математическая модель неполнофазного режима работы асинхронного двигателя с векторным управлением, которая учитывает особенности его функционирования при аварии. Методом имитационного моделирования исследовано влияние различных уровней нагрузки на характеристики электропривода в аварийном неполнофазном режиме. При фиксированном отказе типа обрыв фазы двигателя и аварийном пропадании питающего напряжения преобразователя частоты исследована возможность пуска асинхронного электропривода с отказоустойчивым управлением в неполнофазном режиме работы с сохранением кругового вращающегося поля в электрической машине при различных уровнях нагрузки и с последующим продолжительным функционированием насосного агрегата.

Ключевые слова: имитационная модель асинхронного электродвигателя, асинхронный электропривод, обрыв фазы, матрица отказов, неполнофазный режим работы.

Обеспечение промышленной безопасности опасных производственных объектов является одной из ключевых задач в промышленном производстве. При этом насосные агрегаты на таких объектах, как правило выполняются на основе асинхронных двигателей (АД) с векторным управлением. Неисправность типа «обрыв фазы» АД при традиционном постро-

ении электропривода приводит к полной потере работоспособности насосного агрегата и создает прямую угрозу промышленной безопасности и последующим экологическим и экономическим потерям [1-3]. К таким системам относятся системы охлаждения опасных производственных объектов, например, ядерных реакторов, химических установок или мощных энергетических комплексов. Аварии в таких системах могут вызвать перегрев оборудования, выброс опасных веществ, экологические катастрофы и угрозу жизни персонала и населения. Известные произошедшие инциденты, такие как аварии на АЭС Чернобыля или Фукусимы, подчеркнули важность и необходимость разработки высоконадежных систем управления, способных противостоять аварийным ситуациям. Применение отказоустойчивого построения и управления электроприводом позволяет решить эту проблему.

Разработка отказоустойчивых алгоритмов управления электроприводами опасных производственных объектов позволяет обеспечить непрерывность производственного процесса и минимизировать риски, связанные с возможными авариями. Имитационное моделирование в этих задачах является важным инструментом для исследования и оценки эффективности различных стратегий управления в условиях отказов без необходимости проведения опасных экспериментов на реальном оборудовании.

Обеспечение высоконадежной работы таких систем не только снижает вероятность возникновения аварийных ситуаций, но и способствует повышению общей безопасности производства. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и модернизации систем управления в различных отраслях промышленности, где требования к надежности и безопасности являются приоритетными [4,5].

В данной работе рассматривается задача обеспечения отказоустойчивости систем управления насосными агрегатами в системах охлаждения в случае обрыва фазы в асинхронном двигателе с векторным управлением.

Математическая модель асинхронного электропривода насосного агрегата. В качестве основы используется модель асинхронного двигателя, представленная в [6]. В качестве системы управления используется система отказоустойчивого векторного управления [7], благодаря которому в электродвигателе обеспечивается круговое вращающееся поле, что позволяет не учитывать момент поля обратной последовательности в расчетах.

Электромагнитный момент M_1 (Н·м), создаваемый полем прямой последовательности, определяется по следующим выражением (1):

$$M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{1A} i_{1c} + i_{1B} i_{1a} + i_{1C} i_{1b}) - (i_{1A} i_{1b} + i_{1B} i_{1c} + i_{1C} i_{1a})], \quad (1)$$

где: p – количество пар полюсов электрической машины; L_m – взаимная индуктивность между обмотками ротора и статора (Гн); i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} – токи статора прямой последовательности (А); i_{1a}, i_{1b}, i_{1c} – токи ротора прямой последовательности (А).

Уравнение движения электропривода (2):

$$M_1 - M_c = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

где M_c – момент сопротивления от внешней нагрузки (Н·м); J – приведенный момент инерции к валу электродвигателя механизма (кг·м²).

Итоговое выражения для уравнений поля прямой последовательности (3):

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_1] - \left[[R] + [L_2] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_1] \right\}, \quad (3)$$

где: $[I_1]$ – матрица неизвестных (токи статора и ротора прямой последовательности (А), $[U_1]$ – матрица напряжений прямой последовательности (В) (4); $[L_1]$ матрица индуктивностей статора (Гн) (5), $[L_2]$ – матрица индуктивностей ротора, Гн (6); $[R]$ – матрица сопротивлений (Ом) (7).

$$[I_1] = \begin{bmatrix} I_{1A} \\ I_{1B} \\ I_{1C} \\ I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \end{bmatrix}; [U_1] = \begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{1C} \\ U_{1a} \\ U_{1b} \\ U_{1c} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$[L_1] = \begin{bmatrix} L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m \\ L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где: L_s, L_R – индуктивности обмоток статора и ротора (Гн); L_m – взаимная индуктивность между обмотками ротора и статора (Гн).

$$[L_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) \\ -\frac{3}{2}L_m & 0 & \frac{3}{2}L_m & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) \\ \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) & 0 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где: R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора (Ом).

Для имитации обрыва фазы статора необходимо в исходные выражения для уравнений поля прямой последовательности ввести матрицу отказов $[M_O]$, позволяющую переходить в аварийный двухфазный режим работы (8):

$$[M_O] = \begin{bmatrix} \bar{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Единичное состояние битов отказов $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ в матрице отказов $[M_O]$ будет соответствовать номинальному трехфазному режим работы, а нулевое – обрыву соответствующей фазной статорной обмотки.

Тогда итоговое выражение для матрицы активных сопротивлений примет следующий вид (9):

$$[R_M] = ([1] + k_\infty [M_O])[R], \quad (9)$$

где $[R_M]$ – матрицы активных сопротивлений после отказа (Ом); $[1]$ – единичная матрица, размером 6 на 6, k_∞ – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора.

Окончательные выражения для уравнения поля прямой последовательности примет, следующий вид (10):

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_1] - \left[[R] + [L_2] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \right] \cdot [i_1] \right\}. \quad (10)$$

Имитация обрыва фазы статора осуществляется путем приравниванию соответствующих бит отказов $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ нулю.

Расчет подачи насоса основан на законе подобия и выражается соотношением (11):

$$Q = Q_{\text{ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right), \quad (11)$$

где ω и $\omega_{\text{ном}}$ — текущая и номинальная частоты вращения (рад/с); Q и $Q_{\text{ном}}$ — значения текущей и номинальной подачи насоса (м³/ч) [8,10].

Напор насоса определяется с учетом квадратичной зависимости от частоты вращения и расхода (12):

$$H = H_{\text{ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (12)$$

где ω и $\omega_{\text{ном}}$ — текущая и номинальная частоты вращения (рад/с); H и $H_{\text{ном}}$ — значения фактического и номинального напора (м) [8,10].

Гидравлическая (полезная) мощность насоса определяется по следующей формуле (13):

$$P = \rho g Q H, \quad (13)$$

где ρ — плотность жидкости (кг/м³); $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, Q — подача насоса (м³/ч) [9,10].

Подставив в уравнение гидравлической мощности значения подачи и напора, получим уравнение статической модели ЦН (14):

$$P = \rho g Q_{\text{ном}} H_{\text{ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^3. \quad (14)$$

Момент нагрузки насоса определяется из соотношения между гидравлической мощностью и угловой скоростью ω (15):

$$M_c = \frac{P}{\omega}, \quad (15)$$

где P – гидравлическая мощность насоса (Вт); ω — текущая частота вращения (рад/с).

Таким образом, система уравнений математической модели для описания переходных процессов в неполнофазном режиме трехфазного АД и насосного агрегата примет следующий вид (16):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d[i_1]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \{ [U_1] - [R] + [L_2] \cdot \frac{p \cdot \omega}{\sqrt{3}} \} \cdot [i_1] \} \\ [R_M] = ([1] + k_{\infty} [M_0]) [R] \\ M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{1A} i_{1c} + i_{1B} i_{1a} + i_{1C} i_{1b}) - (i_{1A} i_{1b} + i_{1B} i_{1c} + i_{1C} i_{1a})] \\ M_1 - M_c = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \\ M_c = \frac{P}{\omega} \\ P = \rho g Q_{\text{ном}} H_{\text{ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^3 \end{array} \right. \quad (16)$$

На основе разработанной математической модели асинхронного электродвигателя с отказоустойчивым векторным управлением (16) была создана имитационная модель с использованием языка программирования Python. С помощью имитационной модели были проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых были рассчитаны временные диаграммы работы системы как в штатных, так и в аварийных режимах.

Методология исследования насосного агрегата методом имитационного моделирования. Исследование работы насосного агрегата системы охлаждения в аварийном режиме, вызванном обрывом фазы статора асинхронного двигателя, проведено методом имитационного моделирования и направлено на подтверждение эффективности предложенного алгоритма векторного управления и оценку эксплуатационных характеристик установки.

В рамках первой серии численных исследований выполнено моделирование влияния различных уровней нагрузки на характеристики электропривода при переходе в аварийный режим работы. При этом анализируются основные показатели работы агрегата в относительных единицах: скорость вращения электродвигателя, расход и напор насоса, а также потребляемая мощность. Вычислительные эксперименты позволяют определить оптимальные режимы работы системы при возникновении аварии и оценить способность электропривода поддерживать требуемые технологические параметры [11].

Анализ результатов имитационного моделирования дает возможность оценить эффективность предложенного алгоритма управления,

определить границы работоспособности системы и сформулировать практические рекомендации по эксплуатации насосного агрегата системы охлаждения в аварийном режиме работы. Полученные в ходе численного моделирования данные также позволяют подтвердить теоретические положения об эффективности предложенного подхода к управлению асинхронным двигателем при обрыве фазы статора.

Исследование влияния нагрузки на работу насосного агрегата при обрыве фазы в асинхронном двигателе с векторным управлением. В данном разделе анализируется влияние различных уровней нагрузки на работу насосного агрегата в условиях аварии типа "обрыв фазы" в асинхронном двигателе с векторным управлением. Целью эксперимента является оценка способности системы поддерживать требуемые параметры производительности насоса и выявление изменений в основных рабочих характеристиках после возникновения аварии.

В процессе исследования предполагается, что изначально электродвигатель для опасного производственного объекта выбирается с неполной загрузкой на уровне 0,66 от номинальной мощности для продолжительной эксплуатации, далее в расчетах этот уровень принят за 100%. Далее при отказе в одной из фаз в работе алгоритма восстановления применяется коэффициент увеличения токов 1-1.5 т.е. используется электродвигатель при восстановлении мощности уже до уровня 1,0 от номинальной мощности без нарушения теплового режима работы при продолжительной эксплуатации.

Для моделирования разных уровней нагрузки изменялись номинальные параметры насоса: расход $Q_{\text{ном}}$ (м³/ч) и напор $H_{\text{ном}}$ (м). Были рассмотрены три уровня нагрузки: 66%, 80% и 100% от номинальной. В каждом эксперименте имитировалась авария — обрыв фазы С в момент времени $t = 1.0$ с. Чтобы обеспечить круговое вращающееся магнитное поле в двигателе после обрыва фазы, токи в оставшихся двух фазах сдвигались на угол $\pi/3$, а также обеспечивается равенство МДС оставшихся двух фаз [4].

Измерялись следующие параметры до и после аварии: скорость вращения двигателя, расход насоса Q (м³/ч) напор насоса H (м) и потребляемая мощность P (Вт).

Относительные изменения параметров вычислялись по формуле (17):

$$\Delta X = \frac{X_{\text{после}} - X_{\text{до}}}{X_{\text{до}}} \cdot 100\%, \quad (17)$$

где X — соответствующий измеренный параметр.

Результаты измерений представлены в таблице 1. Результаты моделирования для рассматриваемых уровней нагрузки приведены на рис. 1.

Анализ данных показывает, что при всех уровнях нагрузки система сохраняет высокую устойчивость к обрыву фазы. Скорость вращения двигателя и расход насоса снижаются незначительно — не более чем на 0.7% даже при номинальной нагрузке. Снижение напора находится в диапазоне от 1.1% до 1.3%, что согласуется с теоретической зависимостью напора от квадрата скорости ($H \propto n^2$).

Потребляемая мощность демонстрирует более заметные изменения. При нагрузках 66% и 80% снижение мощности составляет 1.4% и 1.8% соответственно. При номинальной нагрузке (100%) снижение мощности достигает 2.7%. Это указывает на некоторое уменьшение энергетической эффективности системы после аварии, что следует учитывать при её эксплуатации.

**Изменения параметров насосного агрегата после аварии
при разных уровнях нагрузки**

Нагрузка, %	$\Delta \omega$, %	ΔQ , %	ΔH , %	ΔP , %
60	-0.6	-0.6	-1.1	-1.4
80	-0.6	-0.6	-1.2	-1.8
100	-0.7	-0.7	-1.3	-2.7

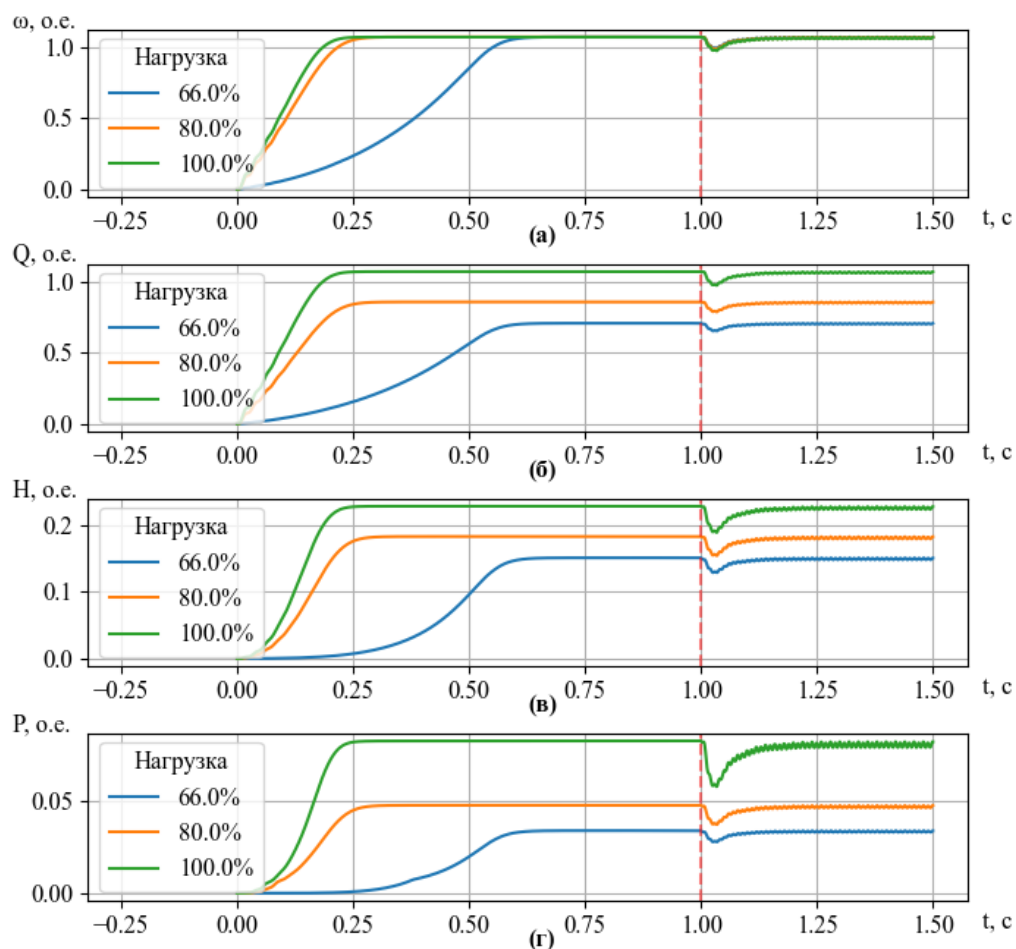


Рис. 1. Характеристики насосного агрегата при различных уровнях нагрузки: а – скорость ротора; б – расход; в – напор; г – мощность.

Исследование аварийных режимов работы асинхронного электропривода насосного агрегата. В следующих вычислительных экспериментах анализировались аварийные режимы работы асинхронного электропривода насосного агрегата при различных сценариях, связанных с обрывом фаз. Рассматривались четыре уровня нагрузки: 66%, 80%, 100% и 150% от номинальной. В каждом эксперименте имитировались аварийные

ситуации, при которых обрыв фазы С происходил в момент времени 1.5 секунды, а обрыв фазы В — в 2 секунды для случаев перехода из трехфазного режима работы в двухфазный, а затем в однофазный. При исследовании процессов пуска в двухфазном режиме работы обрыв одной из оставшихся фаз происходил во время, равное 2 секундам.

Для поддержания кругового вращающегося магнитного поля после обрыва одной из фаз использовался алгоритм восстановления [4].

Исследование включало два эксперимента. В первом сценарии электропривод работал в штатном трехфазном режиме до момента обрыва одной фазы, после чего использовался алгоритм восстановления для сохранения кругового вращающегося магнитного поля (рис. 2). Второй сценарий моделировал пуск двигателя на двух фазах с последующим переходом в однофазный режим, где также применялся алгоритм восстановления (рис. 3).

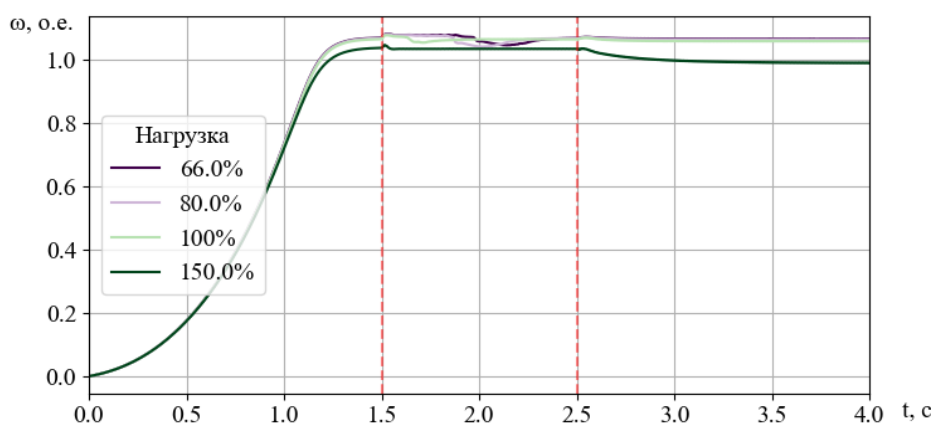


Рис.2. Частота вращения двигателя в аварийных режимах работы с использованием алгоритма восстановления

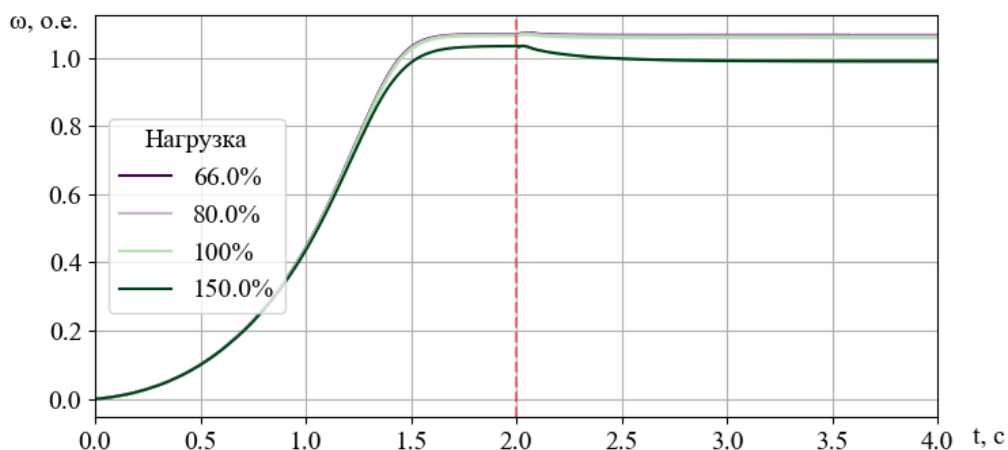


Рис. 3. Пуск двигателя в двухфазном режиме с использованием алгоритма восстановления

Анализ результатов, полученных в результате эксперимента, показывает, что в случае возникновения аварийной ситуации удастся сохранить работоспособность электропривода насосного агрегата. Использование ал-

горитма восстановления позволяет устранить влияние момента обратной последовательности, возникающего в результате несимметрии, в следствии чего уменьшается потребляемая электродвигателем электрическая мощность, а также практически отсутствует просадка по частоте вращения.

Выводы:

1. Разработанный алгоритм управления эффективно поддерживает работу насосного агрегата при обрыве фазы в асинхронном двигателе с векторным управлением. Система способна сохранять необходимые параметры расхода и напора при различных уровнях нагрузки (66%, 80% и 100% от номинальной).

2. Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что разработанный алгоритм управления эффективно поддерживает работу насосного агрегата при обрыве фазы в асинхронном двигателе с векторным управлением. Система способна сохранять необходимые параметры расхода и напора при нагрузках до 100% от номинальной. Небольшие снижения скорости, расхода и напора (не более 0.7% и 1.3% соответственно) не оказывают существенного влияния на производительность системы. Снижение потребляемой мощности при этом находится в пределах от 1.4% до 2.7%.

3. Подключение обмотки статора по схеме с развязанными фазами обеспечивает работоспособность электропривода даже при авариях, связанных с обрывом одной или двух фаз. Применение алгоритма восстановления кругового вращающегося магнитного поля позволяет сохранить частоту вращения на прежнем уровне, минимизировать токи в статоре и снизить влияние момента обратной последовательности, что ведет к уменьшению потребляемой мощности и повышению общей устойчивости системы.

4. В случае пропадания питающего напряжения и повторного включения возможен пуск двигателя на двух оставшихся фазах, что обеспечивает живучесть насосного агрегата. Полученные результаты показывают возможность для практического применения системы в условиях, требующих повышенной надежности и бесперебойности охлаждения.

Список литературы

1. H. Guo, J. Xu and Y. -H. Chen, "Robust Control of Fault-Tolerant Permanent-Magnet Synchronous Motor for Aerospace Application With Guaranteed Fault Switch Process," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7309-7321, Dec. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2453935.

2. J. -M. Yang and S. W. Kwak, "Realizing Fault-Tolerant Asynchronous Sequential Machines Using Corrective Control," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 1457-1463, Nov. 2010, doi: 10.1109/TCST.2009.2039709.

3. K. Lee and M. Lee, "Fault-Tolerant Stability Control for Independent Four-Wheel Drive Electric Vehicle Under Actuator Fault Conditions," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 91368-91378, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994530.

4. Однокопылов Георгий Иванович. Методы и алгоритмы отказоустойчивого управления электроприводами опасных производственных объектов: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: спец. 05.09.03 / Г.И. Однокопылов; науч. конс. В. Г. Букреев. Томск: 2017.

5. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Попов М.М. Микро-ГЭС с регулированием гидроагрегата по цепи якоря гидрогенератора // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т.335. № 5. С. 158–171. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4570.

6. Однокопылов Г.И. Математическая модель асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы / Г. И. Однокопылов, А. Д. Брагин // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. 2013. Т. 323, № 4 : Энергетика. С. 133-137.

7. Odnokopylov G.I. Fault tolerant vector control of induction motor drive / G. I. Odnokopylov, A. Bragin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2014. Vol. 66: 20th International Conference for Students and Young Scientists: Modern Techniques and Technologies (MTT'2014), Tomsk, Russia, 14-18 April 2014. 012015, 6 p. DOI: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/66/1/012015>

8. Однокопылов Г.И. Исследование отказоустойчивого вентильно-индукторного электродвигателя насоса для добычи нефти / Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, И.А. Розаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 10. С. 69-81.

9. Лабах Н. Разработка методических и технологических решений по выбору предвключенных модулей электроцентробежного насоса в осложненных условиях эксплуатации скважин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 25.00.17 / Лабах Нулла. Москва: 2016. 154 с.

10. Нугаев И.Ф., Искужин Р.В. Комплекс математических моделей для синтеза алгоритмов управления процессами в нефтедобывающих скважинах // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. №8 (53). С. 36-44.

11. Хачатурян А.В., Пантюхина Е.В., Прейс В.В. Математическая модель фактической производительности зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором для пустотелых деталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 7. С. 98-110.

Однокопылов Георгий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Odnokopylov@tpu.ru, Россия, Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, ORCID ID: 0000-0002-8923-4668,

Гаврилин Алексей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, gawral@tpu.ru, Россия, Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Брагин Александр Дмитриевич, старший преподаватель, bragin@tpu.ru, Россия, Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Розаев Иван Андреевич, канд. техн. наук, доцент, veazor@tpu.ru, Россия, Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

RESEARCH OF FAULT-TOLERANT PUMPING UNIT WITH INDUCTION ELECTRIC
DRIVE OF A HAZARDOUS INDUSTRIAL FACILITY

G.I. Odnokopylov, A.N. Gavrilin, A.D. Bragin, I.A. Rozaev.

The article presents research of fault-tolerant control of an induction electric drive of a pump unit of a cooling system of hazardous industrial facilities in case of a stator phase failure. The fault-tolerant control is advisable for industrial sectors where failure of an induction electric drive can lead to an emergency situation with dangerous economic damage and significant environmental consequences. Fault-tolerant control is based on the developed fault-tolerant control algorithms and it is advisable to test them by using mathematical and simulation modeling methods. A mathematical model of the open-phase operation mode of an induction motor with vector control considering the features of its operation during an emergency has been developed. The influence of various load levels on the characteristics of the induction electric drive in an emergency open-phase mode has been researched using the simulation method. With a fixed failure such as a motor phase losing and an emergency loss of the supply voltage of the frequency converter, the possibility of starting an induction electric drive with fault-tolerant control in an open-phase operation mode with maintaining a circular rotating field in the electric machine at various load levels and with subsequent long-term operation of the pumping unit was investigated.

Key words: simulation model of an induction electric motor, induction electric drive, phase failure, failure matrix, open-phase operating mode.

Odnokopylov Georgy Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Odnokopylov@tpu.ru, Russia, Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University, ORCID ID: 0000-0002-8923-4668,

Gavrilin Alexey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, gawral@tpu.ru, Russia, Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University,

Bragin Alexander Dmitrievich, senior lecturer, bragin@tpu.ru, Russia, Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University,

Rozaev Ivan Andreevich, candidate of technical sciences, docent, veazor@tpu.ru, Russia, Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<i>Д.М. Малютин</i> Исследование динамики гировертикали	3
<i>А.Ю. Савицкий</i> Методика работы должностных лиц по связи с применением цифровых двойников	15
<i>А.Ю. Савицкий</i> Модель планирования и постановки задач учитывающая возможность использования технологии цифровых двойников	25
<i>Л.И. Алешичева, С. Ю. Борзенкова, А.Н. Троицкий</i> Проведение патентного поиска на платформе роспатента при проектировании объектов техники	34
<i>О.С. Балабаев, А.В. Прохорцов</i> Методика начальной выставки и коррекции БИНС ла в полёте	39
<i>Н.А. Беззубов, О.В. Горячев, С.В. Феофилов</i> Сравнительный анализ нечеткого регулятора и нейрорегулятора на базе сетей радиально-базисных функций с реализацией адаптивного скользящего режима в нелинейных динамических системах	53
<i>Н.А. Беззубов, С.В. Феофилов</i> Синтез нейрорегулятора устойчивого по замкнутому контуру следящего электропривода на основе адаптивного скользящего режима с применением сетей радиально-базисных функций	61
<i>Н.А. Беззубов</i> Методика синтеза адаптивного регулятора электропривода на основе нейронных сетей радиально-базисных функций с обеспечением устойчивости по Ляпунову	67
<i>Л.Д. Беленова</i> Обзор автоматизированных комплексов настройки антенно-фидерных устройств	74
<i>А.А. Наумова, Д.С. Соловьев, А.Ф. Индюхин, А.С. Соколова, Е.А. Белоусова</i> Альтернативный способ управления подвижным объектом	88
<i>М.В. Житный, Э.Г. Синельников</i> Исследование газогенератора с цилиндрической облицовкой методом численного моделирования	93

<i>Л.П. Зозуля, П.С. Гончаров, А.В. Аксенов</i> Определение параметров межорбитальных маневров космического аппарата в зависимости от силы тяги двигателя	99
<i>В.В. Мартынов, Н.А. Шуневич</i> Анализ основных способов и средств скоростного метания твёрдых частиц	107
<i>Г.Р. Пецух, М.А. Девяткина, А.М. Бабин</i> Обзор влияния термодинамических факторов на растворимость галлия	113
<i>Д.С. Феофилов</i> Применение нейромиметиков в задаче отыскания квазиоптимального управления нелинейным объектом	116
<i>Н.А. Епрынцева</i> Особенности использования технологии BIG DATA и AI в современных бизнес-процессах	125
<i>В.Г. Новиков</i> Сравнение программного обеспечения для моделирования процессов сварочного производства	131
<i>А.В. Удальцов</i> Методика повышения своевременности синхронизации баз данных автоматизированных систем специального назначения на основе машинного обучения	135
<i>Е.В. Шевчук, М.С. Афонасьев</i> Система управления технострессом сотрудников библиотек в эпоху цифровой трансформации	151
<i>О.В. Денисов</i> Оптимизация распределения нагрузки по серверным станциям в вычислительном комплексе на основе генетического алгоритма	160
<i>С.В. Чернобровкин</i> Методика построения тракта доведения информации до подвижных объектов специального назначения	165
<i>Е.В. Шевчук, А.Д. Шишкин, М.А. Петрова</i> Цифровая трансформация процесса проектирования компетентностной модели специалиста	178
<i>Н.Г. Гавриленко, И.А. Заворовский</i> Адаптация методов теории распознавания образов в решении задач по анализу поведения человека	189
<i>Е.Е. Майоров, В.В. Курлов, А.В. Арефьев, В.П. Пушкина</i> Применение частично когерентного излучения в интерференционном устройстве для контроля рабочей поверхности полировочного материала оптических изделий	201

<i>Е.Е. Майоров, В.А. Голубков, Р.Б. Гулиев, А.В. Дагаев</i> Использование частично когерентного интерференционного зонда для измерения микрорельефа поверхности обработанных керамических пластин	210
<i>Г.А. Вобликов</i> Использование программного обеспечения и компьютерного моделирования для разработки технологии получения деталей	218
<i>А.А. Даничев, А.И. Карнаухов, С.А. Войнаш, Д.Н. Клёсов</i> Формирования закона распределения случайной величины, представленной ранжированиями	222
<i>П.Ю. Гусев, В.В. Сокольников, И.В. Поцбенева</i> Разработка программы управления элементами полета беспилотного аппарата с использованием модели искусственного интеллекта	229

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

<i>С.А. Назаревич</i> Модели управления знаниями и квалиметрические детерминанты для гетерогенных организационных систем предприятий	235
<i>Е.С. Квас</i> Прогнозирование срока службы роботизированных линий розлива на основе эксплуатационных коэффициентов	244
<i>А.А. Маликов, С.М. Никольский</i> Функционально-стоимостной анализ использования ким для контроля качества зубчатых колес и обкатного зубообрабатывающего инструмента	259
<i>С.Н. Ларин, М.Г. Нурждин, А.С. Даниелян, Е.И. Хунузиди, Г.А. Нурждин</i> Структурирование функции качества и модель КАНО	263
<i>В.Г. Мосин, В.Н. Козловский, А.С. Клентак, О.В. Пантюхин</i> Методика МССР (modeling, calibration, challenge, production) в сравнительном анализе пунктов гарантийного обслуживания автомобилей	272
<i>И.А. Беляева, В.Н. Козловский, А.С. Подгорный, Е.В. Пантюхина</i> Конечно-элементное моделирование как компонент обеспечения качества электромобиля в процессе проектирования	289
<i>А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин</i> Методика комплектования выездных бригад специалистами разного профиля для проведения технического обслуживания и ремонта в местах базирования на примере полигонного оборудования	297

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

<i>А.Н. Петров, Н.А. Бессонова, П.А. Петров, Т.С. Басюк, Б.А. Логинов</i> Методика сканирующей зондовой микроскопии для исследования микроструктуры сплава AlSi10Mg (RS300) после горячей изотермической деформации	300

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

<i>А.А. Шубин, Н.А. Витчук, В.Н. Ефименко, В.Ю. Анцев</i> Обоснование характеристик перспективной машины для локальной вырезки балласта на основе структурирования функции качества	312
<i>А.Н. Шмойлов, Д.Е. Григорьев</i> К вопросу создания бортовых генераторов водорода для автономного подвижного состава на железнодорожном транспорте	319
<i>В.А. Жулай, В.Л. Тюнин, А.Н. Щенко</i> Аналитическое определение положения максимума тяговой мощности колесной землеройно-транспортной машины	325
<i>В.А. Нилов, В.А. Жулай, В.Л. Тюнин</i> Разгрузка рабочего оборудования прямая лопата гидравлического экскаватора при копани грунта	332
<i>А.Н. Шмойлов, Н.В. Лазаревич</i> Совершенствование процесса технического обслуживания и выявления неисправностей железнодорожного подвижного состава	338

МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Л.А. Сладкова, Ван Инь</i> Теоретические исследования устройства обеспечения безопасности лифтов (ловителей)	344
<i>В.Б. Масягин, С.Б. Скобелев, Д.А. Ерофеев, Е.А. Ерофеев</i> Разработка конструкционного слоистого композиционного материала для изготовления детали «ведомое колесо» масляного насоса круглошлифовального станка «RIBON RU-100»	355
<i>А.В. Костенко</i> Метод улучшения качественных показателей линейного пневмопривода с помощью внесения оригинальных изменений в конструкцию	364
<i>В.Б. Масягин, С.Б. Скобелев, Д.А. Ерофеев, Е.А. Ерофеев</i> Механическая обработка конструкционного слоистого композиционного материала для изготовления детали «ведомое колесо» масляного насоса	375

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

<i>Г.И. Однокопылов, А.Н. Гаврилин, А.Д. Брагин, И.А. Розаев</i> Исследование отказоустойчивого асинхронного электропривода насосного агрегата в составе опасного производственного объекта	384

Научное издание

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

Выпуск 1

Редактор С.Н. Ларин

Компьютерная правка и верстка – М.С. Шевков, 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 27.01.25. Дата выхода в свет 31.01.25

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная

Усл.-печ. л. 64,84

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