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 2

Тула
Издательство ТулГУ
2025

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

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

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

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

Члены редакционного совета:

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

ISSN 2071-6168

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

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

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

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

© Авторы научных статей, 2025
© Издательство ТулГУ, 2025

УДК 621.313
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-3-4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЩЕТОК В СКОЛЬЗЯЩЕМ КОНТАКТЕ СИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА

А. С. Макаров, Д. И. Попов, В. В. Харламов

Проведены экспериментальные исследования интенсивности изнашивания электрических щеток ЭГ4 в скользящем контакте синхронного тягового генератора. При проведении исследования учитывались рабочие параметры синхронного тягового генератора. Представлена экспериментальная установка, позволяющая проводить опыты с разной плотностью тока через щетки и частотой вращения колец. Рассмотрены различия между факторами воздействующих на процесс изнашивания на контактных кольцах синхронного генератора и на коллекторе двигателя постоянного тока. Составлен план экспериментального исследования с минимально необходимым количеством опытов. В результате измерений сделаны выводы о применимости полученных результатов в качестве исходных данных для расчета интенсивности изнашивания электрических щеток.

Ключевые слова: износ, скользящий контакт, электрическая щетка, обработка поверхности, эксперимент.

Синхронный тяговый генератор является неотъемлемой частью тепловозов, от стабильности работы которого зависит надежность работы локомотивов в целом. Электрические щётки, устанавливаемые в щеточные аппараты, предназначены для обеспечения электрической связи между подвижной и неподвижной частями электрических машин со скользящим токосъемом. При этом щетка является невосстанавливаемым, но в то же время одним из активных элементов работы щеточного аппарата, наиболее подверженным износу [1]. Вследствие этого они требуют частой замены, ведущих к дополнительным затратам, связанным с неплановой остановкой оборудования. Этот факт показывает, что своевременная замена щетки и возможность определения срока ее службы является довольно важным вопросом.

Износ – нежелательное изменение поверхности или размеров твердых тел, вызванное взаимодействием функциональных поверхностей или функциональных поверхностей и сред. Это проявляется в удалении или перемещении частиц под действием механических воздействий. Эти эффекты могут сопровождаться химическими, электрохимическими или другими воздействиями [2]. Под износом электрических щеток рассматривается уменьшение высоты щетки, вызванное электрическим, механическим, электрохимическим, химическим или иным удалением частиц с поверхности скольжения щетки.

Процесс изнашивания электрических щеток на скользящем контакте коллекторных машин подробно рассмотрен [3], однако теория процесса изнашивания в скользящем контакте контактных колец разработана недостаточно.

Известно выражение (1) для определения износа электрических щеток [4].

$$\frac{\Delta И}{t} = k \cdot n \cdot F(W_0 + W_1 I^{\alpha}), \quad (1)$$

Весовые коэффициенты W_0 и W_1 выражения (1) отражают удельный вес механической (2) и электрической (3) составляющих износа. Для определения интенсивности износа электрических щеток синхронного тягового генератора предложено рассматривать механическую (2) и электрическую (3) составляющие износа как нелинейные, зависящие от частоты вращения контактных колец, процессы [5].

$$kW_0(n) = k_1 + k_2 n^{d1}; \quad (2)$$

$$kW_1(n) = k_3 + k_4 n^{d2}, \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1) получаем выражение для определения интенсивности износа электрических щеток синхронного тягового генератора.

$$\frac{\Delta И}{t}(F, n, I) = \frac{F}{F_{\text{ном}}} \cdot \frac{n}{n_{\text{ном}}} \left(k_1 + k_2 \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^{d1} + \left(k_3 + k_4 \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^{d2} \right) \left(\frac{I}{I_{\text{ном}}} \right)^{\alpha} \right) \quad (4)$$

Для вычисления коэффициентов k_1, k_2, k_3, k_4, α, $d1$, $d2$ необходимо провести экспериментальное исследование износа щеток при различных рабочих параметрах. Статья посвящена проведению исследования процесса изнашивания электрических щеток в скользящем контакте тягового синхронного генератора.

Интенсивность износа щеток на контактных кольцах меньше, интенсивности износа щеток на коллекторных электрических машинах [6], что требует больше времени для проведения отдельных опытов. Минимальное количество опытов экспериментального исследования может быть определено методом планирования эксперимента.

При проведении аналогичных исследований на коллекторных машинах варьируют силу нажатия щетки, силу тока в щетках и скорость вращения контактных колец. Однако ввиду особенностей конструкции

щеткодержателей, применимых в синхронных тяговых генераторах, а также небольшим, для работы щеткодержателя, изменением высоты щетки, сила нажатия остается постоянной. Таким образом в исследовании варьировались всего два параметра. При этом целесообразно использовать ортогональный план второго порядка [7].

Экспериментальная установка для проведения исследования по износу электрических щеток (рисунок 1), включает в себя два установленных на валу контактных кольца, выполненных из стали, приводимые во вращение двигателем постоянного тока (рисунок 2). В щеткодержатели установлены исследуемые электрические щетки марки ЭГ4. Для плавной регулировки плотности тока через исследуемые электрические щетки питание установки выполнено с применением управляемого выпрямителя.



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

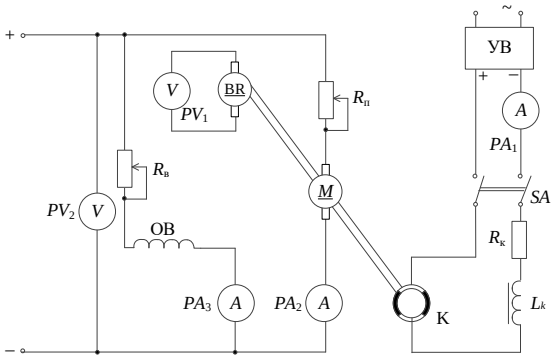


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Так как в эксперименте использовались параметры рабочих режимов синхронного тягового генератора в эксплуатации, необходимо было пересчитать их для экспериментальной установки, на которой проводился эксперимент.

Удельное нажатие на щетки экспериментальной установки должно быть таким же, как в тяговом синхронном генераторе.

Силу нажатия на щетки в эксперименте рассчитывали по выражению (5):

$$F_э = F_г \frac{S_э}{S_г}, \qquad (5)$$

где $F_г$ – сила нажатия на щетки в синхронном генераторе; $S_г$ – площадь контактной поверхности щетки тягового генератора; $S_э$ – площадь контактной поверхности щетки на экспериментальной установке.

Для определения диапазона варьирования частоты вращения контактных колец в эксперименте ($n_{э\ max}$ - $n_{э\ min}$) необходимо минимальное (n_{min}) и максимальное (n_{max}) значения эксплуатационных частот вращения контактных колец синхронного тягового генератора в эксплуатации пересчитать по выражениям (6) и (7):

$$n_{э\,min} = n_{min}\frac{R_г}{R_э}, \quad (6)$$

$$n_{э\,max} = n_{max}\frac{R_г}{R_э}, \quad (7)$$

где $R_г$ – радиус контактных колец синхронного тягового генератора; $R_э$ – радиус контактных на экспериментальной установке.

Для определения диапазона варьирования тока щетки в эксперименте ($I_{э\ max}$ - $I_{э\ min}$) необходимо минимальное (I_{min}) и максимальное (I_{max}) значения токов щетки в эксплуатации синхронного тягового генератора пересчитать по выражениям (8) и (9):

$$I_{э\,min} = I_{min}\frac{S_э}{S_г}, \quad (8)$$

$$I_{э\,max} = I_{max}\frac{S_э}{S_г}, \quad (9)$$

где $S_г$ – площадь контактной поверхности щетки тягового генератора; $S_э$ – площадь контактной поверхности щетки на экспериментальной установке.

При ортогональном плане второго порядка значения «звездного» плеча принимают равным $\alpha^* = 1$. Таким образом, необходимо проводить девять опытов сочетая разные скорости вращения и токи через щетку. План исследования представлен в таблице.

План проведения эксперимента

Параметры опытов		Значение постоянного тока через щетки, А		
		10	30	50
Значение частоты вращения контактных колец, об/мин	462	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
	931	Опыт 4	Опыт 5	Опыт 6
	1400	Опыт 7	Опыт 8	Опыт 9

Перед проведением эксперимента были подготовлены контактные поверхности скользящего контакта. Первым шагом была подготовка контактной поверхности контактных колец. Электрические щетки были извлечены из щеткодержателей, контактная поверхность кольца была очищена с помощью шлифовального камня.

На втором этапе выполнена механическая притирка электрической щетки к поверхности кольца с политурой. Щетки устанавливались в щет-

кодержатели, и под щетки на контактные поверхности колец подкладывалась специальная наждачная бумага.

Завершающим этапом стала наработка политуры, на котором кольца вращались в течение трех часов с прижатыми к ним щетками при постоянном токе через щетку 50 А.

Длительность проведения каждого опыта из плана эксперимента составляла 120 часов. Измерение износа проводилось в трех точках: в центре набегающего края щетки, в центре контактной поверхности щетки, в центре сбегающего края щетки при помощи микрометра.

Полученные результаты измерения применялись для определения коэффициентов k_1, k_2, k_3, k_4, α, $d1$, $d2$. Были определены коэффициенты выражения (4), при которых отклонения значений интенсивности износа, рассчитанных по выражению и полученных экспериментально при одинаковых входных данных, минимальны [5]. Получены следующие значения коэффициентов: α = 0,55; d_1 = 1,00; d_2 = 0,95, $k_1(\alpha, d_1, d_2)$ = 1,034; $k_2(\alpha, d_1, d_2)$ = 0,115; $k_3(\alpha, d_1, d_2)$ = 0,392; $k_4(\alpha, d_1, d_2)$ = 0,0031.

С учетом значений полученных коэффициентов выражение (4) преобразуется в выражение для определения интенсивности износа щеток синхронного генератора (5):

$$\frac{\Delta И}{t}(F,n,I) = F\left(1{,}511n + 168\cdot 10^{-6}n^2 + 31{,}51\cdot 10^{-3}nI^{0{,}55}\right)10^{-6}. \quad (5)$$

Анализ полученных результатов по моделированию процесса изнашивания с учетом рабочих режимов, показывает, что в результате испытаний анодная щетка имеет больший износ, чем катодная, что согласуется с результатами теоретических и практических исследований известных ученых, работающих по тематике износа электрических щеток [4, 8, 9, 10, 11]. Применяя выражение (5) была получена поверхность отклика остаточного пробега щетки (рисунок 3).

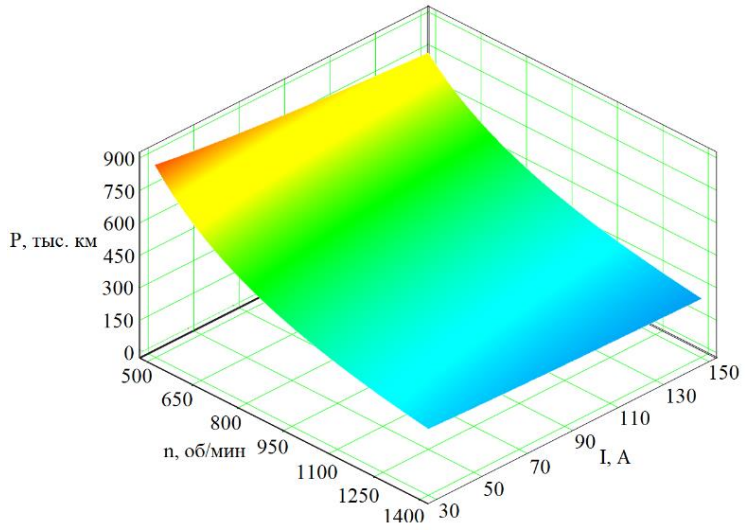


Рис. 3. Поверхность отклика остаточного пробега щетки

Из всего вышесказанного следует что результаты по исследованию процесса износа могут быть использованы в качестве исходных данных для аналитического определения интенсивности износа и прогнозирования остаточного ресурса электрических щеток синхронного тягового генератора.

Список литературы

1. ГОСТ 21888-82. Щетки, щеткодержатели и контактные кольца электрических машин. Термины и определения: государственный стандарт СССР : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 30 марта 1982 г. № 1332 : дата введения 1983-01-01. М. : Издательство стандартов, 1982. 46 с.

2. Основы триботехники : учебник для вузов / Ю. А. Евдокимов, Э. Д. Браун, Н. А. Буш, А. В. Чичинадзе ; Ростовский государственный университет путей сообщения. Ростов-на-Дону : Наука и техника, 1995. 778 с.

3. Пат. 2757784 Российская Федерация, МПК H01R 39/58. Способ определения остаточного ресурса электрических щеток тягового электродвигателя. Харламов В. В., Попов Д. И. № 2021103446: заявл. 11.02.2021: опубл. 21.10.2021.

4. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961. 464 с.

5. Макаров, А. С. Методика определения остаточного ресурса щеточного узла тягового генератора с учетом особенностей эксплуатации и технического состояния щеточного узла / А. С. Макаров, М. Ф. Байсадыков // Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии в промышленности и на транспорте : Материалы X всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора М.Ф. Карасева и 80-летию со дня образования кафедры "Электрические машины и общая электротехника", Омск, 05–06 декабря 2023 года. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2023. С. 100-108.

6. Байсадыков, М. Ф. Разработка метода оценки интенсивности изнашивания и алгоритма прогнозирования остаточного ресурса щеток тяговых электродвигателей : специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Байсадыков М. Ф. Омск, 2020. 20 с.

7. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.

8. Крагельский, И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчета на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

9. Мышкин Н. К., Кончиц В. В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. 560 с.

10. Качин О. С. Повышение ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей: автореф. дис... кандидата технических наук. Томск, 2008. 21 с.

11. Качин О. С., Качин С. И. Увеличение ресурса скользящего контакта электрических машин: моногр. = LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 165 с.

Макаров Артем Сергеевич, аспирант, martyom1597@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный университет путей сообщения,

Попов Денис Игоревич, д-р техн. наук, профессор, emoe@omgups.ru, Россия, Омск, Омский государственный университет путей сообщения,

Харламов Виктор Васильевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Россия, Омск, Омский государственный университет путей сообщения

STUDY OF WEAR PROCESS OF ELECTRIC BRUSHES ON CONTACT RINGS SLIDING CONTACT

A. S. Makarov, D. I. Popov, V. V. Kharlamov

Authors performed experimental studies of wear intensity of electric brushes EG4 in the sliding contact of synchronous traction generator. When carrying out the study, we took into account the operating parameters of the synchronous traction generator. The paper presents the experimental setup, which allows conducting experiments with different current density through brushes and rings rotation frequency. There are considered the differences between the factors influencing the process of wear on the contact rings of the synchronous generator and on the collector of the DC motor. We prepared a plan of experimental research with the minimum necessary number of experiments. The conclusion about applicability of the obtained results as initial data for calculation of intensity of wear of electric brushes is made as a result of measurements.

Keywords: wear, sliding contact, electric brush, surface treatment, experiment.

Makarov Artem Sergeyevich, postgraduat, martyom1597@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Transport University,

Popov Denis Igorevich, doctor of technical sciences, professor, emoe@omgups.ru, Russia, Omsk, Omsk State Transport University,

Kharlamov Viktor Vasylyevich, doctor of technical sciences, professor, head of department, Russia, Omsk, Omsk State Transport University

УДК 629.424.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-10-11

УЛУЧШЕНИЕ СВЕТОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

А.В. Муратов, И.К. Кулишев

В статье рассмотрены недостатки действующих систем освещения пути тяговым подвижным составом, достоинства и недостатки ламп накаливания и светодиодных прожекторов. Предложены технологические решения по повышению эффективности работы систем освещения локомотивов и как следствие повышение безопасности движения.

Ключевые слова: прожектор, лампы накаливания, светодиодный прожектор, недостаточная освещенность пути.

В настоящее время все большее применение на железнодорожном транспорте находит светодиодная техника, в том числе и на тяговом автономном подвижном составе [1,2].

Эффективность освещения подвижного состава напрямую связано с безопасностью движения поездов поэтому этой проблеме уделяется много внимания со стороны производителей железнодорожной техники, а также компании ОАО «РЖД» [3,4].

К световым приборам тягового подвижного состава относят: буферный фонари – сигнальная часть, прожектор – освещающая часть.

В настоящее время наиболее часто встречающихся лампами на световых приборах подвижного состава являются лампы накаливания, которые устанавливаются в узкопрофильный прожектор. Прожектор работает в двух режимах «ярко» и «тускло». Режим «тускло» используется при движении поездов навстречу друг другу, на двухпутных и многопутных участках и при маневровой работе [5].

В современных локомотивах последнее время все большее применение находят светодиодные лампы, которые интегрированы в специальные модули. Конструкция модульного светодиодного проектора состоит из нескольких независимых светодиодных ячейках с индивидуальными источниками питания.

Поэтому на тяговом подвижном составе, как правило применяют следующие виды прожекторов, а именно с лампами накаливания и светодиодные. Светодиоды, и фокусирующая сборка, представляет собой оптическую систему модульного светодиодного прожектора.

Также для эффективной системы работы светодиодного прожектора в конструкции необходимо предусмотреть устройства для отвода тепла на основе алюминия и алюминиевых радиаторов [6].

Рассмотрим преимущества и недостатки каждого вида.

Лампы накаливания:

1. Преимущества: легкость конструкции, следовательно простота обслуживания и замены лампы локомотивной бригады в случае выхода ее из строя;

2. Не слепит встречные поезда в ночное время при переключении на режим тускло

3. в зимнее время года не загрязняется снегом.

1. Недостатки: большое энергопотребление;

2. Небольшой срок службы;

3. Часто приходится регулировать отражатель, из-за вибраций;

4. Небольшой световой поток;

5. При замене лампы можно обжечься.

Светодиодные лампы:

1. Преимущества: большой и яркий световой поток;

2. Низкое электропотребление;

1. Недостатки: сложная конструкция, следовательно, невозможен ремонт локомотивной бригадой в пути следования;

2. В зимнее время года загрязняется снегом

Главным критерием все же остается это большой световой поток, который влияет на безопасность движения.

В любом случае используемые системы освещения – прожекторы должны выполнять определенные нормы безопасности (таблица 1) [7,8].

Таблица 1

Нормы значений силы света локомотивного прожектора

Режим работы осветительного прибора локомотива	Осевая сила света, кКд
Ярко	640-960
Тускло	70-120

Значимым недостатком двух вышеперечисленных систем является слепая зона при прохождении составом в кривых, которая ярко выражена в городское среде, где много деревьев, кустарников и строений, которые находятся близко к железнодорожным путям, а иногда и частный сектор, где нежелательно подавать громкие сигналы свистка и тифона при следовании в ночное время.

Рассмотрим случай при движении локомотива в кривом участке пути. При движении в кривых участках световой поток не успевает сменить траекторию, что приводит к образованию слепой зоны при движении.

На рис.1 обозначены желтым кривая, прожектор и световое пятно. На данном рисунке можно увидеть, что кривая уходит в лево, световой поток не изменяет свою траекторию, из-за чего образуется слепая зона.

Для решения этой проблемы предлагается использовать следующую модернизацию осветительных приборов тягового подвижного состава.

Для этого в конструкцию буферных фонарей интегрируются лампы большей мощности, что в свою очередь позволит уменьшить слепую зону при движении.

На рис.2 видно, что если в буферные фонари поставить лампы большей мощности, то при прохождении кривой от них световой поток будет закрывать слепую зону. Для этого в систему управления основным

прожектором будет интегрировано управление буферными фонарями, что позволит в положении «ярко» автоматически подключать буферные фонари с повышенной мощностью.

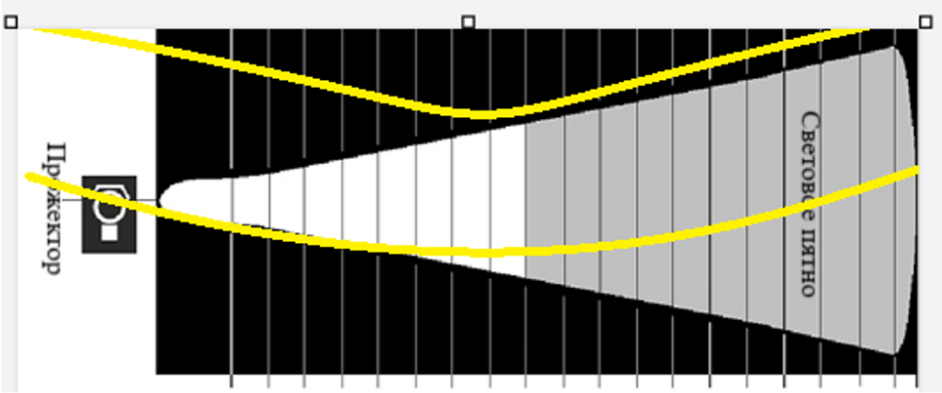


Рис. 1. Траектория светового потока при стандартной компоновке осветительных приборов тягового подвижного состава

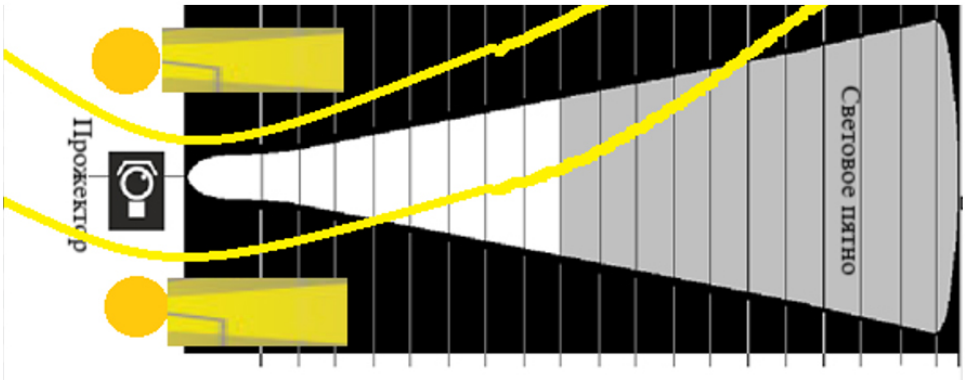


Рис. .2 Использование буферных фонарей для уменьшения слепой зоны при движении тягового подвижного состава в кривой

Следующим решением по уменьшению слепых зон при движении в кривых участках пути можно считать модернизацию существующую систему освещения локомотива, которая будет состоять из трех секций (центральной и двух боковых), иметь обтекаемую выносную форму, обязательный обогрев, специальный пульт управления и датчики наклона.

Предлагаемая схема реализуется следующим обрзом.

На пульте машиниста располагаются четыре переключателя (автоматическое управлени/ручное, прожектор выкл/тускло/ярко, секция справа выкл/вкл, секция слева выкл/вкл). Для автоматического управления на кузов локомотива устанавливаются датчики углов наклона, работа которых будет зависеть от профиля пути и скорости движения. В зависимости от условий движения сигналы с датчиков будут поступать на осветительные приборы, на основании чего будет выбираться режим работы

При необходимости машинист может вмешаться работу системы с помощью органов управления пульта.

На рис. 3 представлена схема светового потока разработанной схемы.

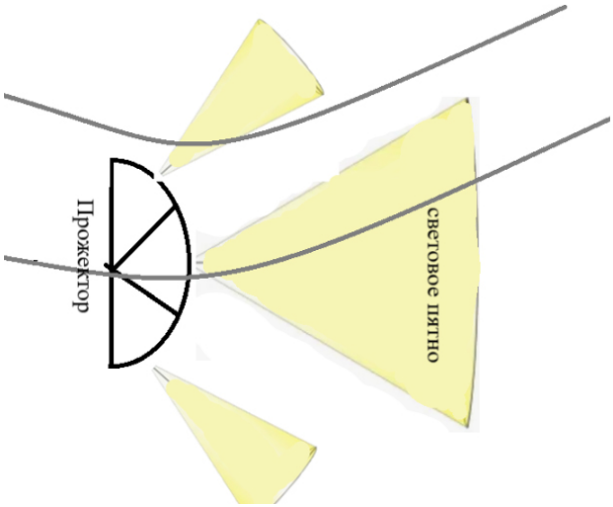


Рис. 3. Использование нового типа прожектора для уменьшения слепой зоны при движении тягового подвижного состава в кривой

Как показывает практика эксплуатации подвижного состава стандартные системы освещения не обеспечивают безопасность движения в ночное время. Для повышения безопасности предлагается внедрить дополнительную систему освещения для улучшения видимости при движении в кривых участках пути. Предлагаемая система позволит равномерно осветить путь в ночное время при любой кривизне пути, не слепя локомотивную бригаду встречно идущего состава.

Список литературы

1. Харитонов И.В. Интеллектуальные возможности применения светодиодных систем на локомотивах железнодорожного транспорта / Б. С. Сергеев, И. В. Харитонов. // Труды третьей научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование. ИСУЖТ-2014. 2014. С. 217-219.

2. Сергеев Б.С. Светодиодные светофоры: проблемы разработки и применения / Б.С. Сергеев, С.А. Щиголев, В.Г. Любар. // Автоматика связь, информатика. 2001. № 5. С. 19-23.

3. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 (с изменениями на 11 июня 2014 года): распоряжение Правительства РФ от 22.11.2008 № 1734-р в ред. распоряжения Правительства РФ от 11.06.2014 № 1032-р. // Собрание законодательства РФ, 2014, № 25. ст. 3349.

4. Концепция комплексной программы «Внедрение светодиодной техники в ОАО «РЖД» / Ададуров С.Е. [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2009. № 2. С. 2-5.

5. Харитонов И.В., Сергеев Б.С. Светодиодные головные прожекторы локомотивов // Железнодорожный транспорт. 2015. № 12. С. 59-60.

6. Харитонов И.В. Повышение безопасности движения локомотива в кривых / И.В. Харитонов, Б.С. Сергеев. // Транспорт Урала. 2015. № 2. С. 87- 91.

7. Тепловозы. Нормы безопасности. НБ ЖТ ЦТ 02-98. Ред. 1. М.: ОАО «РЖД». 2003. 87 с.

8. Электровозы. Нормы безопасности. НБ ЖТ ЦТ 04-98. Ред. 1. М.: Минтранс России, 2003. 87 с.

Муратов Алексей Владимирович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, muratov@samgups.ru, Россия Самара, Приволжский государственный университет путей сообщения,

Кулишев Илья Константинович, сотрудник, kulishov@samgups.ru, Россия, Самара, Приволжский государственный университет путей сообщения

IMPROVEMENT OF LIGHT INDICATORS OF TRACTION ROLLING STOCK

A.V. Muratov, I.K. Kulishev

The article considers the disadvantages of existing track lighting systems with traction rolling stock, the advantages and disadvantages of incandescent lamps and LED spotlights. Technological solutions are proposed to improve the efficiency of locomotive lighting systems and, as a result, improve traffic safety

Key words: floodlight, incandescent lamps, LED floodlight, insufficient illumination of the path.

Muratov Alexey Vladimirovich, candidate of technical sciences, head of the department, muratov@samgups.ru, Russia, Samara, Privolzhsky State Transport University,

Kulishev Ilya Konstantinovich, employee, kulishov@samgups.ru, Russia, Samara, Privolzhsky State Transport University

УДК 621.314.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-15-16

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЁМКОСТНОГО ФИЛЬТРА В ИМПУЛЬСНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ

А.В. Фролов, Н.А. Петраков, В.И. Голубева

Представлены результаты теоретического расчёта и числового моделирования в программе SimInTech работы ёмкостного фильтра с однополупериодным выпрямителем в однотактных прямоходовом и обратноходовом преобразователях напряжения, а также в широтно-импульсном регуляторе постоянного напряжения. Представлены зависимости среднего значения и коэффициента пульсаций выходного напряжения фильтра от параметров входного импульсного сигнала (частоты, длительности импульса), а также от ёмкости фильтра и сопротивления нагрузки. Предложены формулы зависимостей указанных величин. Показана возможность использования ёмкостного сглаживающего фильтра взамен традиционного LC-фильтра в импульсном преобразователе напряжения.

Ключевые слова: импульсный преобразователь, ёмкостный фильтр, коэффициент пульсаций, среднее напряжение, широтно-импульсная модуляция, моделирование, SimInTech.

Введение. Схемотехнические решения с импульсными принципами работы получили широкое распространение в различных областях современной электронной техники, главным образом в устройствах вторичного электропитания [23]. Это явление объясняется более высоким коэффициентом полезного действия импульсных устройств по сравнению с устройствами, работающими в линейном режиме, что обуславливает снижение массогабаритных показателей указанных устройств благодаря минимизации систем охлаждения. Кроме того, импульсные схемы в источниках электропитания преобразовывают напряжение на высокой частоте (десятки – сотни килогерц), в результате чего применяемые силовые трансформаторы имеют сердечники с меньшим сечением, а также применяемые сглаживающие фильтры имеют меньшие ёмкости конденсаторов и индуктивности дросселей, что также улучшает массогабаритные показатели устройств [9].

Форма выходного напряжения импульсного преобразователя близка к прямоугольной. Для выделения постоянной составляющей в выходном напряжении импульсного преобразователя применяются пассивные сглаживающие фильтры нижних частот, которые фильтруют гармоники в этом напряжении. Традиционно для этой цели применяются Г-образные *LC*-фильтры, так как они обеспечивают оптимальный компромисс между высоким коэффициентом сглаживания пульсаций и простотой схемы по сравнению с другими схемами фильтров (*L*-, *C*-, *RC*-, *T*-образные, П-образные и др.) [19]. Но применение катушек индуктивности имеет ряд недостатков, в том числе: электромагнитное радиоизлучение, взаимное влияние дросселей друг на друга, более высокие (по сравнению с конденсаторами и резисторами) габариты, масса и стоимость, а также необходимость

применения схемотехнических решений по предотвращению бросков напряжения, возникающих во время переходных процессов при коммутации цепей с дросселем [18]. Так как фильтрующие свойства дросселя наиболее эффективно проявляются при больших токах, то представляет практический интерес применение *C*-фильтров взамен *LC*-фильтрам в преобразователях энергии с малоамперной нагрузкой [21]. Предлагаемое решение не является новым и используется преимущественно в повышающих, инвертирующих и, менее часто, в обратноходовых преобразователях [14]. Но в прямоходовых преобразователях, понижающих *DC-DC* преобразователях [6], а также в преобразователях по *Zeta*-топологии [4] данное решение не нашло широкого применения.

Настоящая статья посвящена решению указанного вопроса исследования возможности и оценки эффективности применения ёмкостных фильтров в импульсных преобразователях напряжения.

Существующие подходы к расчёту фильтров импульсных преобразователей напряжения. При расчёте сглаживающих фильтров обычно используются рекомендации производителей интегральных схем управления импульсными преобразователями, например, для преобразователя *MAX*17504 [2, 15] по формулам:

$$L = \frac{U_{\text{вых}}}{f}, \quad C = \frac{0{,}5 \cdot I_{\text{вых}} \cdot t_r}{\Delta U_{\text{вых}}}, \quad t_r = \left(\frac{0{,}33}{f_C} + \frac{1}{f}\right), \quad U_{\text{вых}} = \gamma \cdot U_{\text{вх}},$$

где L - индуктивность дросселя фильтра, Гн; $U_{\text{вых}}$ - выходное напряжение преобразователя, В; f - частота широтно-импульсного модулятора (ШИМ), Гц; C - ёмкость конденсатора, Ф; $I_{\text{вых}}$ - ток нагрузки, А; $\Delta U_{\text{вых}}$ – пульсации выходного напряжения, В; $f_C = \frac{f}{9}$ при $f \le 500$ кГц и $f_C = 55$ кГц в остальных случаях; $U_{\text{вх}}$ - входное напряжение, В; γ - коэффициент заполнения (длительность рабочего цикла ШИМ).

Для преобразователей на базе микросхемы *MC*34063 [1] повышающего типа по формулам:

$$C \ge 9\frac{I_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вых}}} t_{on}, \quad \frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{в}} - U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}} - \Delta U_{\text{к}}}, \quad U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}}\left(1 + \frac{t_{on}}{t_{off}}\right),$$

$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{\gamma}{1-\gamma}, \quad U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}}\frac{1}{1-\gamma},$$

где t_{on} – длительность открытого состояния транзистора, с; t_{off} - длительность закрытого состояния транзистора, с; $\Delta U_{\text{в}}$ - падение напряжения на выходном выпрямителе, В; $\Delta U_{\text{к}}$ - падение напряжения на транзисторном ключе, В.

Для неизолированного повышающего преобразователя в [20] предлагается следующая расчётная формула:

$$C \ge \frac{I_{\text{вых}}}{f \cdot \Delta U_{\text{вых}}}\left(2 - \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}}\right).$$

Для расчёта конденсатора фильтра многофазного повышающего преобразователя авторы [12] предлагают формулу:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{I_{\text{вых}} \cdot \gamma_{max}}{f \cdot C \cdot N} + I_{L.p} \cdot ESR, \quad \gamma_{max} = \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}.min}}{U_{\text{вых}}}, \quad U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}}\frac{1}{1-\gamma}.$$

где $I_{L.p}$ - пиковый ток дросселя, А; ESR - эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, Ом; N - количество фаз.

Для ёмкостного фильтра повышающего преобразователя в [5] приводится формула:

$$C \geq \frac{I_{\text{вых}.max}(1-\gamma)}{f \cdot \Delta U_{\text{вых}}}, \quad \gamma = 1 - \frac{U_{\text{вх}.min} \cdot \eta}{U_{\text{вых}}}, \quad U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}} \frac{\eta}{1-\gamma}.$$

где η - КПД преобразователя (порядка 80%).

Для преобразователей на базе микросхемы *MC*34063 [1] инвертирующего типа по формулам:

$$C \geq 9 \frac{I_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вых}}} t_{on}, \quad \frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{в}}}{U_{\text{вх}} - \Delta U_{\text{к}}}, \quad U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}} \frac{t_{on}}{t_{off}} = U_{\text{вх}} \frac{\gamma}{1-\gamma}.$$

Для импульсного инвертирующего преобразователя также встречается формула:

$$C \geq \frac{I_{\text{вых}.max} \cdot \gamma_{max}}{2 \cdot \Delta U_{\text{вых}} \cdot f}.$$

Для преобразователей на базе микросхемы *MC*34063 [1] понижающего типа по формулам:

$$C \geq \frac{I_{\text{н}}}{4 \cdot f \cdot \Delta U_{\text{вых}}}, \quad \frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{в}}}{U_{\text{вх}} - \Delta U_{\text{к}} - U_{\text{вых}}}, \quad U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}} \frac{1}{\frac{t_{off}}{t_{on}} + 1} = U_{\text{вх}} \cdot \gamma.$$

Для понижающего ШИМ преобразователя расчёт фильтра следующий [8]:

$$L = (U_{\text{вх}.max} - U_{\text{вых}}) \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}.max}} \cdot \frac{1}{f \cdot LIR \cdot I_{\text{н}}}, \quad LIR = 0{,}2 \ldots 0{,}5,$$

$$C = \frac{L \cdot I_{\text{н}.max}^2 \cdot \left(1 + \frac{LIR}{2}\right)^2}{(\Delta U_{\text{вых}} + U_{\text{вых}})^2 - U_{\text{вых}}^2},$$

где LIR - коэффициент пульсаций тока дросселя (среднее значение – 0,5).

Для *SEPIC* преобразователя в [13] приводятся выражения:

$$C \geq \frac{I_{\text{вых}} \cdot \gamma_{max}}{0{,}5 \cdot f \cdot \Delta U_{\text{вых}}}, \quad \gamma = \frac{U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{в}}}{U_{\text{вх}} + U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{в}}}, \quad U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}} \frac{\gamma}{1-\gamma}.$$

Для *SEPIC* преобразователя с ёмкостным фильтром в [7] приводится следующая формула:

$$C \geq \frac{K_{u.min} \cdot I_{\text{вых}} \cdot t_{on.min}}{f \cdot \Delta U_{\text{вых}}}, \quad U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}} \frac{\gamma}{1-\gamma}.$$

где$K_{u.min}$ - минимальное значение коэффициента передачи схемы ($K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$).

Для ёмкостного выходного фильтра *DC-DC* преобразователя авторы [16] предлагают следующую формулу:

$$C \geq \frac{I_{\text{вых}.max}(1-\gamma_{min})}{p \cdot f \cdot \Delta U_{\text{вых}}},$$

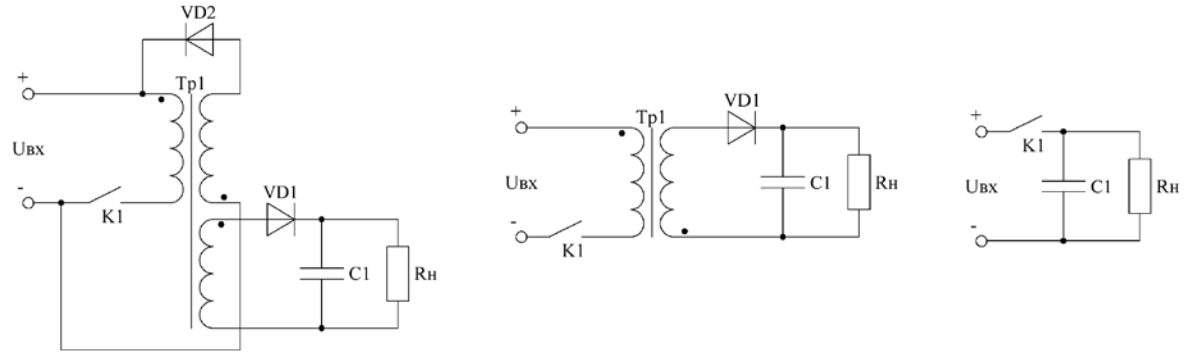
где p - пульсность схемы выпрямителя.

Также существуют специализированные программы расчёта элементов импульсных преобразователей (*RedExpert*, *MAXIM EE-Sim*, *Booster*, *PI Expert Suite*, *Poweresim* и др.), но алгоритм их расчёта авторами не раскрывается.

Из вышеизложенного следует отметить, что формулы расчёта ёмкости конденсатора выходного сглаживающего фильтра сильно разнятся у

разных авторов. Кроме того, пульсации выходного напряжения в указанных формулах задаются не коэффициентом пульсаций ($K_{\text{п}} = \frac{U_{1.m}}{U_{\text{ср}}}$, где $U_{1.m}$ - амплитуда первой гармоники, В; $U_{\text{ср}}$ - среднее значение напряжения, В), а размахом выходного напряжения ($\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}.max} - U_{\text{вых}.min}$, где $U_{\text{вых}.max}$ - максимальное значение выходного напряжения, В; $U_{\text{вых}.min}$ - минимальное значение выходного напряжения, В), что затрудняет интерпретацию результатов расчётов. Также необходимо отметить, что во всех вышеприведённых формулах выходное напряжение определяется только входным напряжением и длительностью рабочего цикла ШИМ (при пренебрежении падениями напряжения на выпрямителе и силовом ключе) и не зависит от тока нагрузки, что на самом деле соответствует действительности только при больших токах нагрузки или малых значениях ёмкости конденсатора сглаживающего фильтра.

Математическая модель работы ёмкостного фильтра в импульсных преобразователях напряжения. Силовые цепи маломощных импульсных преобразователей постоянного напряжения (*DC*/*DC* конверторов) выполняются, как правило, либо по прямоходовой, либо по обратноходовой схемам, а ШИМ регуляторы постоянного напряжения - по схеме с последовательным ключом (рис. 1). Эти схемы могут работать без дросселя в составе сглаживающего фильтра (пренебрегая индуктивностями обмоток трансформатора преобразователей) [11].



а ***б*** ***в***

Рис. 1. Упрощённые схемы силовых цепей преобразователей напряжения с ёмкостным фильтром: а - прямоходового; б – обратноходового; в – ШИМ регулятора

Как видно из рис.1, выходные цепи рассматриваемых схем одинаковы и содержат: выпрямительный диод *VD*1, конденсатор сглаживающего фильтра *C*1, активную нагрузку *R*н, а также эквивалентное активное внутреннее сопротивление импульсного преобразователя *R*вн (рис. 2). В работе приняты следующие допущения: форма выходного напряжения импульсного преобразователя – идеальная прямоугольная; индуктивность трансформатора и ёмкость между первичной и вторичной обмотками не учитывается; переходные процессы при коммутации транзисторных ключей не

учитываются; учитывается внутреннее активное сопротивление цепи до силового ключа; считается, что схема работает на активную нагрузку; внутреннее сопротивление диода и падение напряжения на нём не учитываются; конденсатор считается идеальным [22].

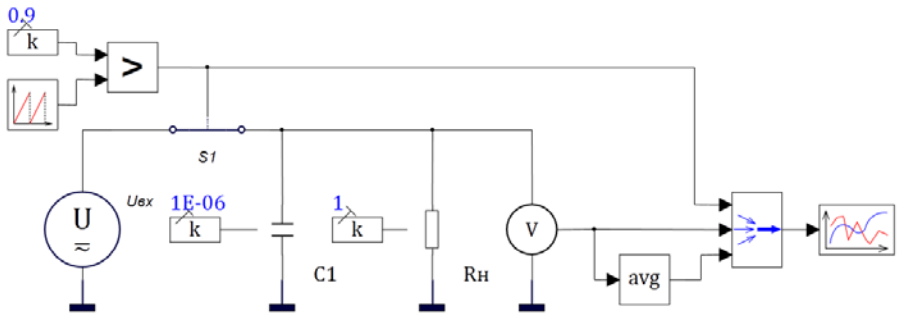


Рис. 2. Моделируемая схема замещения выходной силовой цепи импульсного преобразователя напряжения в программе SimInTech

Математическое описание процессов в представленной схеме следующее. При поступлении на вход схемы прямоугольного напряжения, превышающего напряжение на конденсаторе, диод открывается и конденсатор заряжается от напряжения $U1$ по экспоненциальному закону (рис. 3):

$$U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вх}}\frac{R\text{н}}{R\text{вн}+R\text{н}} - \left(U_{\text{вх}}\frac{R\text{н}}{R\text{вн}+R\text{н}} - U1\right)\cdot exp\left(-\frac{t\cdot(R\text{вн}+R\text{н})}{C1\cdot R\text{вн}\cdot R\text{н}}\right).$$

К моменту завершения импульса ($t = t_{\text{и}}$) напряжение на выходе схемы (на конденсаторе) станет равным:

$$U_{\text{и}} = U_{\text{вх}}\frac{R\text{н}}{R\text{вн}+R\text{н}} - \left(U_{\text{вх}}\frac{R\text{н}}{R\text{вн}+R\text{н}} - U1\right)\cdot exp\left(-\frac{t_{\text{и}}\cdot(R\text{вн}+R\text{н})}{C1\cdot R\text{вн}\cdot R\text{н}}\right).$$

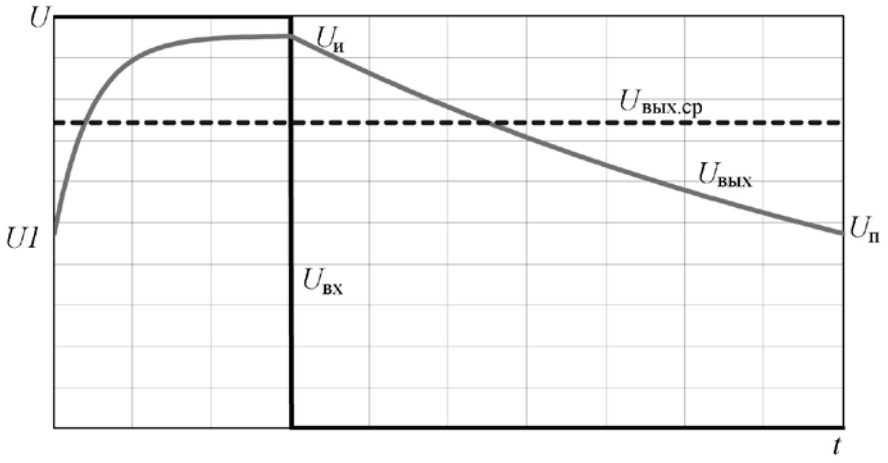


Рис. 3. Диаграммы напряжения на выходе преобразователя

Во время паузы конденсатор разряжается через нагрузку по закону:

$$U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{и}}\cdot exp\left(-\frac{t}{C1\cdot R\text{н}}\right).$$

К концу паузы напряжение на выходе схемы станет равным:

$$U_{\text{п}} = U_{\text{и}} \cdot exp\left(-\frac{t_{\text{п}}}{C1 \cdot R\text{н}}\right). \quad (1)$$

Далее цикл повторяется. В установившемся режиме $U1 = U_{\text{п}}$, откуда:

$$U_{\text{и}} = U_{\text{вх}} \cdot k \cdot \frac{1-exp\left(-\frac{t_{\text{и}}}{\tau_{\text{и}}}\right)}{1-exp\left(-\frac{t_{\text{п}}}{\tau_{\text{п}}}-\frac{t_{\text{и}}}{\tau_{\text{и}}}\right)}, \quad (2)$$

$$k = \frac{R\text{н}}{R\text{вн}+R\text{н}},\ \ \tau_{\text{п}} = C1 \cdot R\text{н},\ \ \tau_{\text{и}} = C1 \cdot R\text{вн} \cdot k = \tau_{\text{п}} \frac{R\text{вн}}{R\text{вн}+R\text{н}},$$

$$t_{\text{и}} = \frac{\gamma}{f},\ \ t_{\text{п}} = \frac{1-\gamma}{f},\ \ U_{\text{и}} = U_{\text{вх}} \cdot k \cdot \frac{1-exp\left(-\frac{\gamma}{C1 \cdot f}\left(\frac{1}{R\text{н}}+\frac{1}{R\text{вн}}\right)\right)}{1-exp\left(-\frac{1}{C1 \cdot f}\left(\frac{1}{R\text{н}}+\gamma\frac{1}{R\text{вн}}\right)\right)},$$

$$U_{\text{п}} = U_{\text{вх}} \cdot k \cdot \frac{1-exp\left(-\frac{\gamma}{C1 \cdot f}\left(\frac{1}{R\text{н}}+\frac{1}{R\text{вн}}\right)\right)}{1-exp\left(-\frac{1}{C1 \cdot f}\left(\frac{1}{R\text{н}}+\gamma\frac{1}{R\text{вн}}\right)\right)} \cdot exp\left(-\frac{1-\gamma}{C1 \cdot f \cdot R\text{н}}\right),$$

$$\delta U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{и}}}{U_{\text{п}}} - 1 = exp\left(\frac{1-\gamma}{C1 \cdot f \cdot R\text{н}}\right) - 1 = exp\big(\alpha(1-\gamma)\big) - 1, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{T}{\tau_{\text{п}}} = \frac{1}{C1 \cdot R\text{н} \cdot f},$$

где $\delta U_{\text{вых}}$ - относительные пульсации выходного напряжения; $U_{\text{и}}$ - выходное напряжение в конце рабочего хода ШИМ (максимальное выходное напряжение), В; $U_{\text{п}}$ - выходное напряжение в начале рабочего хода ШИМ (минимальное выходное напряжение), В.

Среднее значение напряжения нагрузки определялось следующим образом:

$$U_{\text{вых.ср}} = \frac{1}{T}\int_0^T U_{\text{вых}}(t)dt =$$

$$= f\left(\int_0^{t_{\text{и}}}\left(k \cdot U_{\text{вх}} - (k \cdot U_{\text{вх}} - U_{\text{п}}) \cdot exp\left(-\frac{t}{C1 \cdot R\text{вн} \cdot k}\right)\right)dt + \right) +$$

$$+ \int_0^{t_{\text{п}}}\left(U_{\text{и}} \cdot exp\left(-\frac{t}{C1 \cdot R\text{н}}\right)\right)dt =$$

$$= k \cdot U_{\text{вх}} \cdot \gamma + f \cdot \Bigg(C1 \cdot R\text{вн} \cdot k \cdot (k \cdot U_{\text{вх}} - U_{\text{п}}) \cdot \left(exp\left(-\frac{\gamma}{C1 \cdot R\text{вн} \cdot k \cdot f}\right) - 1\right) +$$

$$+ U_{\text{и}} \cdot C1 \cdot R\text{н} \cdot \left(1 - exp\left(-\frac{1-\gamma}{C1 \cdot R\text{н} \cdot f}\right)\right)\Bigg) =$$

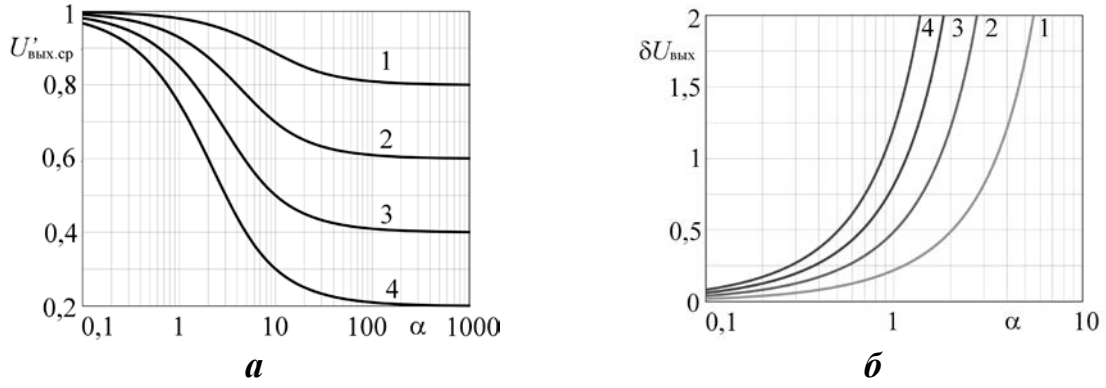
$$U_{\text{вх}}\left[k \cdot \gamma - \frac{k^2 \cdot C1 \cdot R\text{н} \cdot f}{\exp(\beta)-1}\left(1 + \exp(\beta) - exp\left(\frac{\gamma-1}{C1 \cdot R\text{н} \cdot f}\right) - exp\left(-\frac{\gamma}{C1 \cdot k \cdot f \cdot R\text{вн}}\right)\right)\right],$$

$$\beta = -\frac{R\text{вн}+\gamma \cdot R\text{н}}{C1 \cdot R\text{вн} \cdot R\text{н} \cdot f}.$$

Для повышения универсальности полученной формулы приведу её к относительным единицам, заменив $U'_{\text{вых.ср}} = \frac{U_{\text{вых.ср}}}{kU_{\text{вх}}}$ и:

$$U'_{\text{вых.ср}} = \gamma + \frac{k}{\alpha\left(e^{\left(-\alpha\left(1+\gamma \cdot \frac{R\text{н}}{R\text{вн}}\right)\right)}-1\right)}\left(e^{(\alpha(\gamma-1))} + e^{\left(-\alpha \cdot \gamma \cdot \left(1+\frac{R\text{н}}{R\text{вн}}\right)\right)} - e^{\left(-\alpha\left(1+\gamma \cdot \frac{R\text{н}}{R\text{вн}}\right)\right)} - 1\right). \quad (4)$$

Первая составляющая полученного выражения (γ) соответствует тем режимам работы схемы, при которых выходное напряжение преобразователя не зависит от тока нагрузки и которые были описаны в формулах, представленных в обзорной части статьи. Но это справедливо лишь для случаев $\alpha = \frac{T}{\tau_п} \gg 1$. В остальных случаях среднее значение выходного напряжения преобразователя будет располагаться в диапазоне $\gamma \leq U'_{\text{вых.ср}} \leq 1$ (рис. 4) и зависеть не только от частоты ШИМ и постоянной времени цепи разряда конденсатора, но и от соотношения между сопротивлениями Rн и Rвн. Из рис. 4 видно, что приведённые в обзорной части статьи формулы справедливы для случая $T > 100\tau_п$.



а ***б***

Рис. 4. Зависимость относительного среднего выходного напряжения преобразователя (а) и амплитуды пульсаций выходного напряжения (б) от постоянной времени цепи фильтра при разных значениях коэффициента заполнения: 1 - γ = 0,8; 2 - γ = 0,6; 3 - γ = 0,4; 4 - γ = 0,2

При выполнении условия Rвн $\ll R$н уравнение (4) преобразуется к следующему виду:

$$U'_{\text{вых.ср}} = \gamma + \frac{1-exp(\alpha(\gamma-1))}{\alpha}. \quad (5)$$

Коэффициент пульсаций напряжения нагрузки рассчитывался следующим образом:

$$K_p = \frac{U_{1.m}}{U_{\text{вых.ср}}},$$

где K_p – коэффициент пульсаций напряжения; $U_{1.m}$ – амплитуда первой гармоники, В.

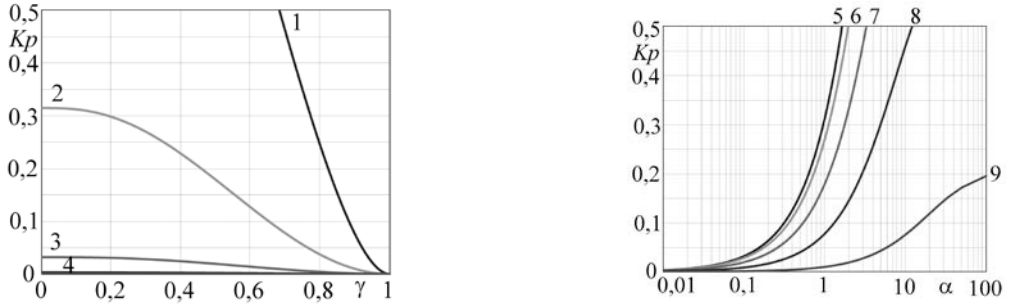
Расчёт амплитуды первой гармоники выполняется с помощью преобразования Фурье:

$$U_{1.m} = \sqrt{A1^2 + B1^2}, \quad A1 = \frac{2}{T}\int_0^T U_{\text{вых}}(t)\cos(2\pi f t)\,dt,$$

$$B1 = \frac{2}{T}\int_0^T U_{\text{вых}}(t)\sin(2\pi f t)\,dt.$$

Результаты расчётов – на рис. 5. Как видно из рис. 5, резкий рост коэффициента пульсаций наблюдается при $\gamma \to 0$. Поэтому для обеспечения низкого коэффициента пульсаций необходимо, чтобы $\gamma > 0{,}5\%$. Также

анализ рис. 5 показывает, что для получения приемлемых коэффициентов пульсаций ($K_p < 5\%$) необходимо выполнение условия $T < 0{,}1\tau_{\text{п}}$.



а ***б***

Рис. 5. Зависимости коэффициента пульсаций выходного напряжения преобразователя от коэффициента заполнения при разных постоянных времени цепи (а) и от постоянной времени цепи при разных коэффициентах заполнения (б): 1 – $T = 10\tau$; 2 - $T = 1\tau$; 3 - $T = 0{,}1\tau$; 4 - $T = 0{,}01\tau$; 5 - $\gamma = 0{,}1$; 6 - $\gamma = 0{,}3$; 7 -$\gamma = 0{,}5$; 8 -$\gamma = 0{,}7$; 9 -$\gamma = 0{,}9$

Для случая $R\text{вн} \to 0$ формула расчёта коэффициента пульсаций преобразуется к виду:

$$K_p = \frac{1}{\pi\left(\frac{1-e^{\alpha(\gamma-1)}}{\alpha}+\gamma\right)} \cdot \sqrt{\frac{\frac{2\pi}{\alpha}\left[2\left(1-e^{\alpha(\gamma-1)}\right)\left(\frac{2\pi}{\alpha}+\sin(2\gamma\pi)\right)-\frac{2\pi}{\alpha}\left(1-e^{2\alpha(\gamma-1)}\right)\right]+4\sin^2(\gamma\pi)}{1+\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)^2}}. \quad (6)$$

Анализ формул (4) – (6) показывает следующую особенность работы импульсных преобразователей с ёмкостным фильтром. Так как импульсные преобразователи напряжения работают в системах стабилизации с обратной связью, то изменение тока нагрузки приводит к повышению выходного напряжения в соответствии с выражением (4) или (5), система стабилизации снижает коэффициент γ [17], что, в свою очередь приводит к изменению амплитуды и коэффициента пульсаций напряжения нагрузки в соответствии с выражениями (2) и (6).

Аналитический вывод зависимости $\gamma = f\left(\alpha, U'_{\text{вых.ср}}\right)$ является достаточно сложной математической задачей, поэтому продемонстрирует вышесказанное не в общем виде, а на примере. Пусть параметры работы схемы: $f = 100$ кГц; $R\text{вн} = 0{,}1$ Ом; $C1 = 1$ мкФ; $R\text{н} = 1$ Ом (что соответствует $\alpha = 10$); $\gamma = 0{,}9$; $U_{\text{вх}} = 20$ В. В результате, на выходе схемы $U_{\text{вых}} = 17{,}4$ В; $K_p = 8{,}8\%$; $\delta U_{\text{вых}} = 1{,}72$ ($U_{\text{п}} = 6{,}7$ В; $U_{\text{и}} = 18{,}2$ В). Предположим, что ток нагрузки снизился в 10 раз, что эквивалентно повышению эквивалентного сопротивления нагрузки до $R\text{н} = 10$ Ом, что будет соответствовать $\alpha = 1$ и приведёт к повышению выходного напряжения до $U_{\text{вых}} = 19{,}69$ В. Для стабилизации выходного напряжения на заданном уровне $U_{\text{вых}} = 17{,}4$ В система управления снизит длительность рабочего цикла ШИМ до $\gamma = 0{,}475$. А это приведёт к повышению коэффициента пульсаций выходного напряжения до $K_p = 19{,}6\%$; но к снижению

амплитуды пульсаций выходного напряжения до $\delta U_{\text{вых}} = 0{,}69$ ($U_{\text{п}} = 11{,}7$ В; $U_{\text{и}} = 19{,}8$ В). Результаты моделирования – на рис. 6 - 10.

Моделирование работы фильтра. Моделирование выполнялось в программе *SimInTech* [3, 10]. Результаты моделирования – на рис. 6 – 12. Моделирование выполнялось для следующих значений элементов схемы: $f = 100$ кГц; $R\text{вн} = 0{,}1$ Ом; $C1 = 1$ мкФ; $R\text{н} = 1$ Ом (что соответствует $\alpha = 10$); $\gamma = 0{,}9$; $U_{\text{вх}} = 20$ В; и $R\text{н} = 10$ Ом; $\gamma = 0{,}475$.

а

б

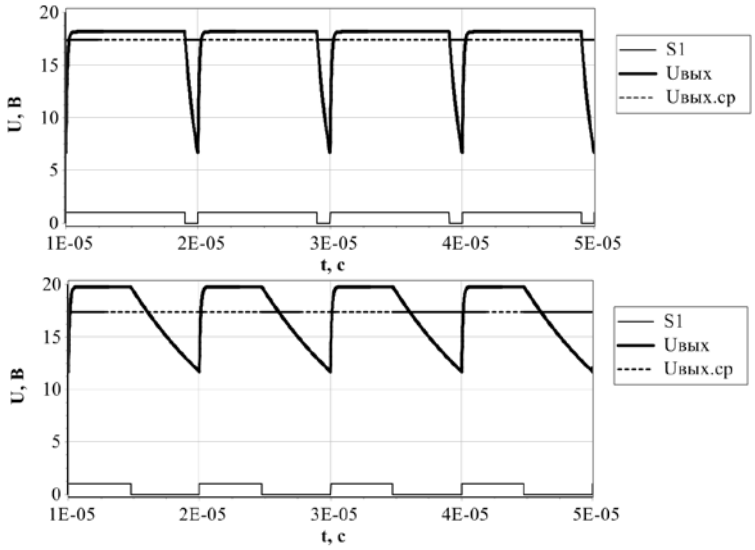


Рис. 6. Диаграммы состояний силового ключа (S1), выходного напряжения преобразователя при: а – Rн = 1 Ом, γ = 0,9; б - Rн = 10 Ом, γ = 0,475

а

б

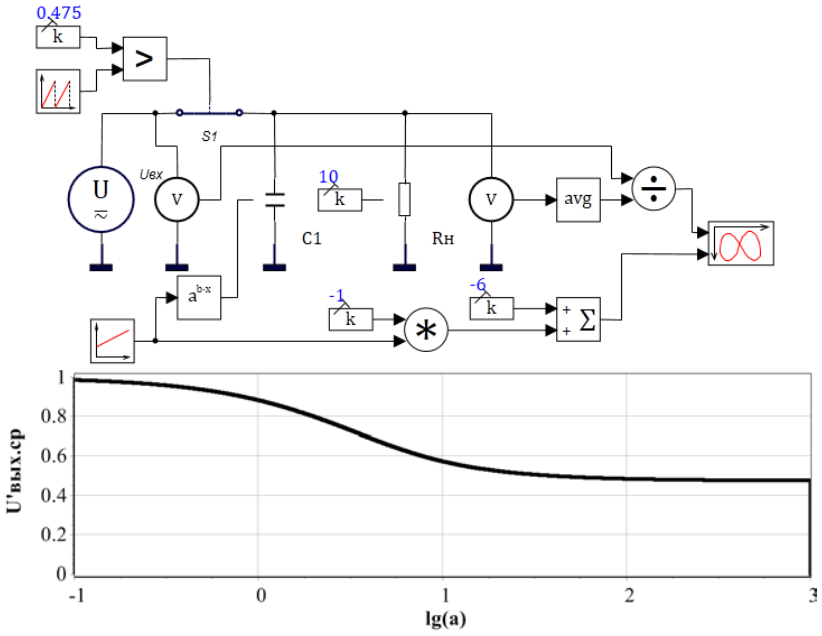


Рис. 7. Схема исследования в программе SimInTech (а) и диаграмма (б) зависимости относительного среднего выходного напряжения от постоянной времени цепи при γ = 0,475

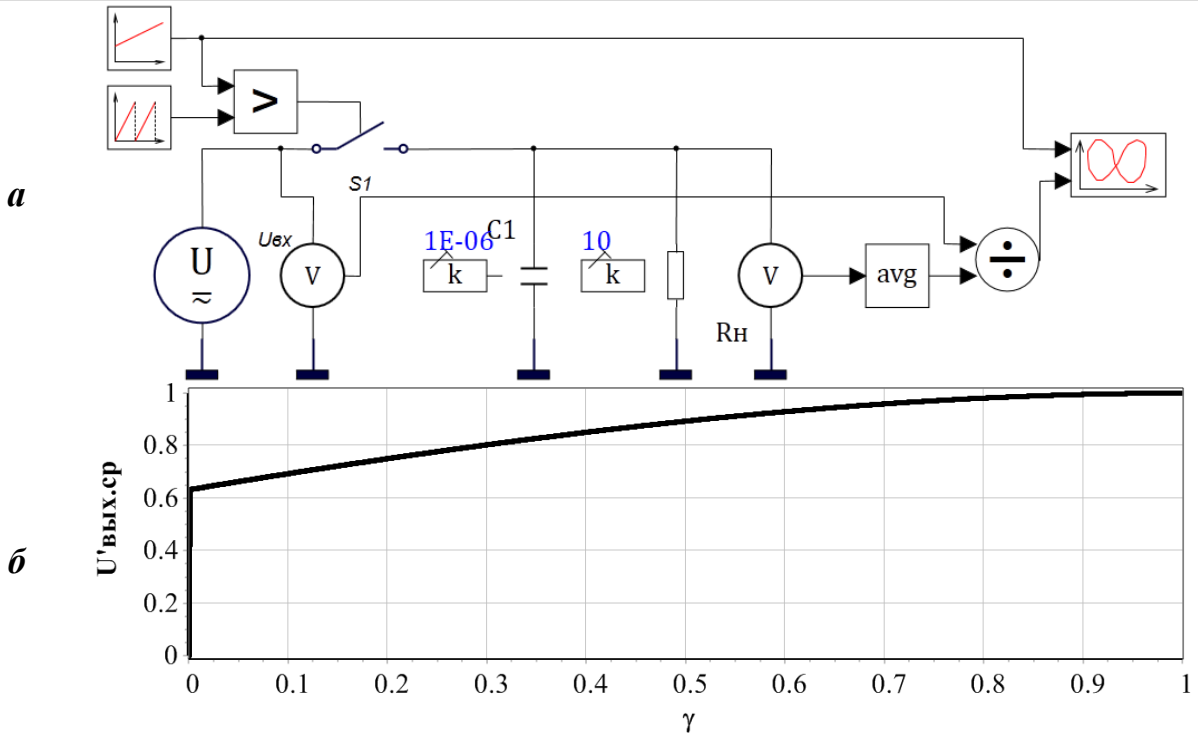


Рис. 8. Схема исследования в программе SimInTech (а) и диаграмма (б) зависимости относительного среднего выходного напряжения от длительности прямого хода ШИМ при α = 1

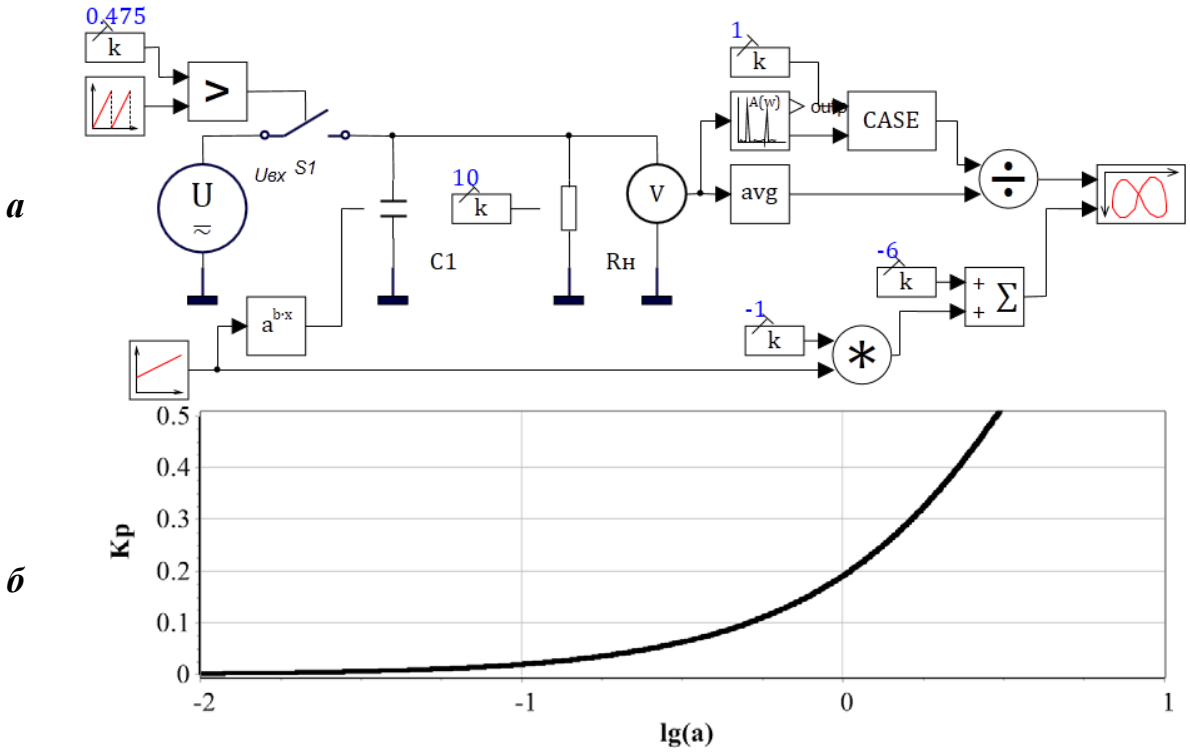


Рис. 9. Схема исследования в программе SimInTech (а) и диаграмма (б) зависимости коэффициента пульсаций выходного напряжения от постоянной времени цепи при γ = 0,475

а

б

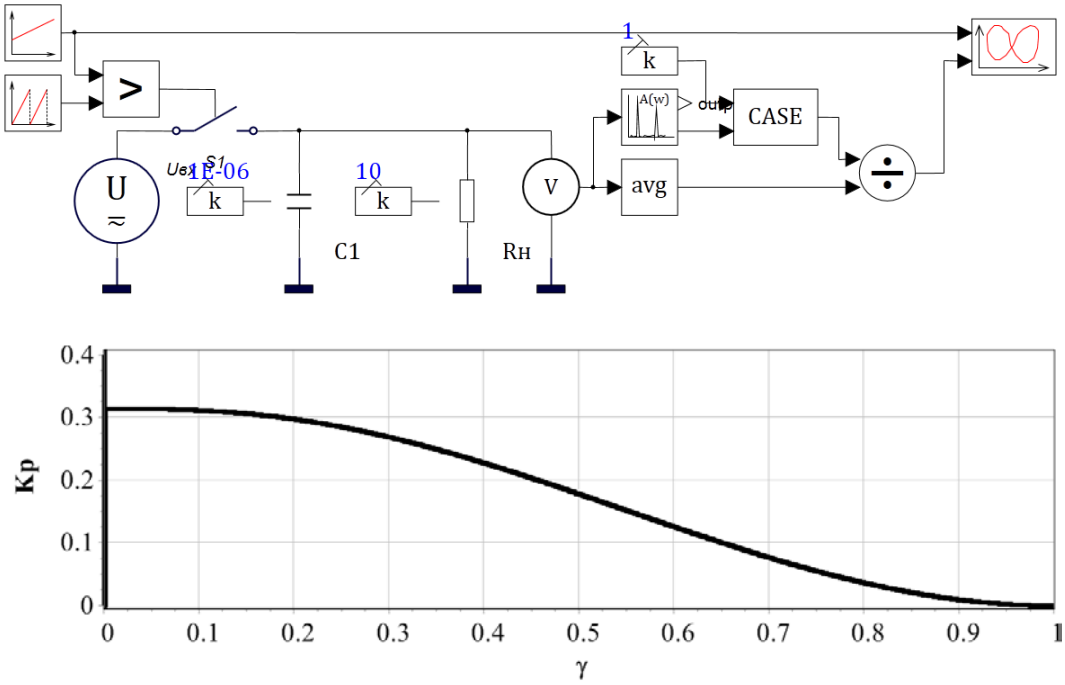
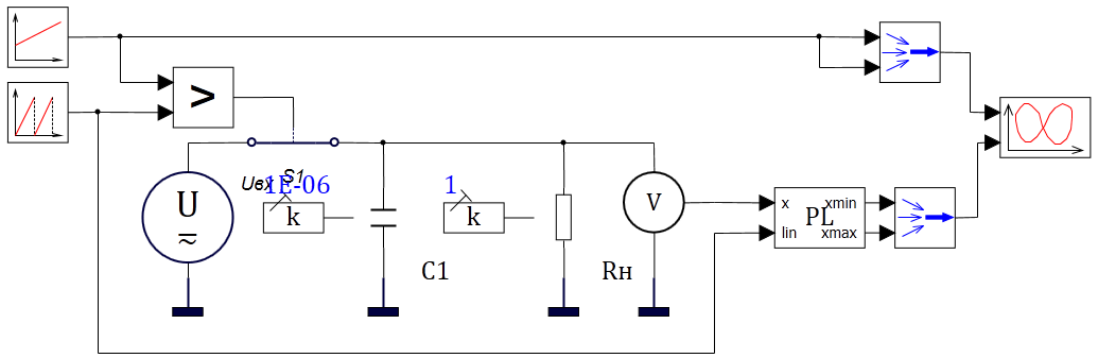


Рис. 10. Схема исследования в программе SimInTech (а) и диаграмма (б) зависимости коэффициента пульсаций выходного напряжения от длительности прямого хода ШИМ при $\alpha = 1$

а

б



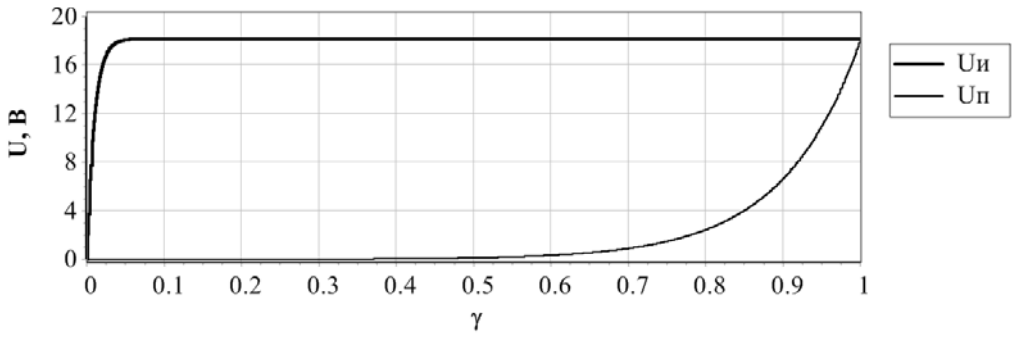


Рис. 11. Схема исследования (а) и диаграмма (б) зависимости максимального (Uи) и минимального (Uп) значений выходного напряжения от длительности прямого хода ШИМ при $\alpha = 10$

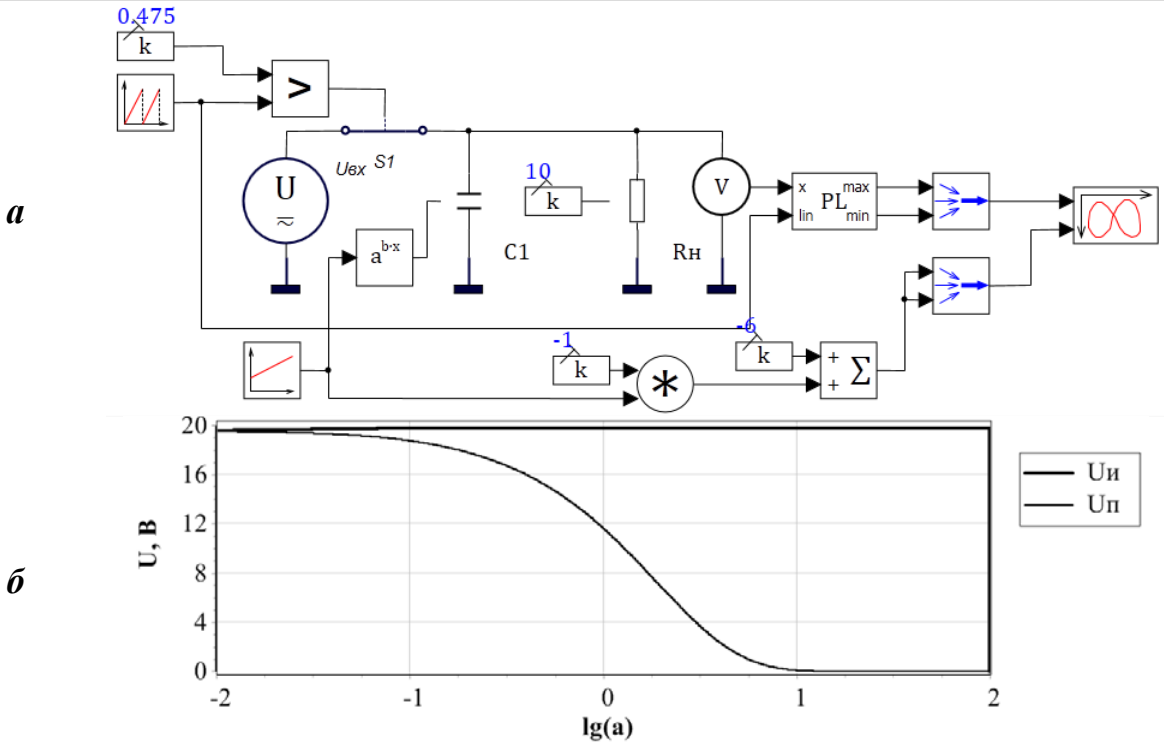


Рис. 12. Схема исследования в программе SimInTech (а) и диаграмма (б) зависимости максимального (Uи) и минимального (Uп) значений выходного напряжения от постоянной времени цепи при γ = 0,475

Результаты моделирования работы схемы в программе *SimInTech* (рис. 6 - 12) подтверждают результаты теоретических расчётов по формулам (1) – (6) (рис. 4 – 5).

Заключение. Расчётные формулы среднего значения выходного напряжения импульсного преобразователя и его пульсаций, рекомендуемые производителями микросхем этих преобразователей, значительно отличаются друг от друга, что порождает вопрос о выборе наиболее адекватной формулы при расчёте схемы. Кроме того, указанные формулы не учитывают зависимость выходного напряжения от тока нагрузки, ёмкости конденсатора сглаживающего фильтра и внутреннего сопротивления преобразователя. Более того, зарубежные производители микросхем вместо отечественного показателя «коэффициент пульсаций выходного напряжения» в расчётах используют величину амплитуды пульсаций выходного напряжения, которая не является прямым эквивалентом отечественному коэффициенту показателя качества напряжения.

В результате теоретических расчётов получены уравнения для определения:

- минимального и максимального напряжений нагрузки (1) и (2);
- относительного изменения напряжения нагрузки (3);
- среднего значения напряжения нагрузки (4), (5);
- коэффициента пульсаций напряжения нагрузки (6).

Справедливость полученных уравнений подтверждена результатами моделирования работы схемы в программе SimInTech.

Линейная зависимость среднего значения выходного напряжения от длительности рабочего цикла ШИМ, приводимая в рекомендациях производителей микросхем, справедлива для случаев с очень маленьким значением постоянной времени цепи ($C \cdot R\text{н} < \frac{0{,}01}{f}$). Более высокие значения постоянной времени цепи (вследствие повышения ёмкости конденсатора или снижения тока нагрузки) приводят к повышению уровня выходного напряжения вплоть до уровня входного напряжения ШИМ ключа.

В работе показана возможность замены *LC*-фильтра на *C*-фильтр в высокочастотных прямоходовых, обратноходовых и понижающих преобразователях. Применение ёмкостного фильтра с $C > \frac{10}{f \cdot R\text{н}}$ обеспечивает коэффициент пульсаций напряжения нагрузки не более 5% при длительностях рабочего цикла ШИМ $\gamma > 0{,}5\%$. Более низкие значения длительности рабочего цикла ШИМ при небольших значениях постоянной времени цепи приводят к возрастанию коэффициента пульсаций и не рекомендуются к использованию.

При проектировании схем стабилизированных импульсных преобразователей необходимо учитывать, что снижение тока нагрузки в некоторых случаях может ухудшить коэффициент пульсаций напряжения нагрузки по следующей причине. Снижение тока нагрузки приводит к повышению выходного напряжения из-за работы ёмкостного фильтра. Для стабилизации напряжения нагрузки система управления понижает длительность рабочего хода ШИМ, что, в свою очередь, приводит к повышению коэффициента пульсаций напряжения нагрузки.

Исследования, изложенные в материале статьи, проводились в рамках гранта ФГБОУ ВО № ВН001/2023.

Список литературы

1. Inverting Regulator - Buck, Boost, Switching 1.5 A MC34063A, MC33063A, SC33063A, NCV33063A. DATA SHEET, ON Semiconductor. [Электронный ресурс] URL: https://static.chipdip.ru/lib/871/DOC011871563.pdf (дата обращения: 31.01.2025).

2. MAX17504, 4.5V–60V, 3.5A, High-Efficiency, Synchronous Step-Down DC-DC Converter with Internal Compensation, Maxim Integrated Products. [Электронный ресурс] URL: https://static.chipdip.ru/lib/821/DOC011821786.pdf (дата обращения: 31.01.2025).

3. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С.Н. Иванов, К.К. Ким, А.А. Просолович, М.И. Хисматулин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3(51). С. 29-38. DOI 10.17084/20764359-2021-51-29. EDN CLTWBH.

4. Битюков В.К. Анализ пульсаций DC/DC-преобразователя, построенного по Zeta-топологии, с использованием его предельной непрерывной математической модели / В. К. Битюков, А. И. Лавренов, Д. А. Малицкий // Russian Technological Journal. 2023. Т. 11, № 4. С. 36-48. DOI 10.32362/2500-316X-2023-11-4-36-48. EDN YKRSZQ.

5. Бригитта Х. Расчет силового каскада повышающего преобразователя // Электронные компоненты. 2010. № 6. С. 25 – 27.

6. Захаров А. Расчёт выходного фильтра ШИМ-инвертора // Современная электроника. 2005. № 6. С. 48 – 50.

7. Иоффе Д. Разработка импульсного преобразователя напряжения с топологией SEPIC // Компоненты и технологии. 2006. № 9(62). С. 126-132. EDN KEZFLF.

8. Иоффе Д. Разработка понижающего преобразователя без секретов // Компоненты и технологии. 2007. № 4(69). С. 106-109. EDN MTFQDJ.

9. Климаш В.С. Разработка конденсаторных установок и способа регулирования реактивной мощности в системах промышленного электроснабжения / В. С. Климаш, Б. Д. Табаров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 1(57). С. 7-14. DOI 10.17084/20764359-2022-57-7. EDN SLMLUK.

10. Колесник М.Б. Имитационное и экспериментальное моделирование электромеханического привода герметичной задвижки / М.Б. Колесник, А.С. Гудим // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 7(63). С. 52-58. DOI 10.17084/20764359-2022-63-52. EDN UWYIKB.

11. Копытов С.М. Выбор схемы замещения мощного стабилитрона для использования в модуляторе сетевого напряжения диммируемой осветительной сети / С.М. Копытов, С.А. Босхомджеев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 1(65). С. 60-67. DOI 10.17084/20764359-2023-65-60. EDN SRMCVZ.

12. Кулаков А. Расчет и схемотехника повышающих DC/DC преобразователей напряжения высокой мощности / А. Кулаков, В. Хасиев // Силовая электроника. 2008. № 18. С. 36-40. EDN MVRUQD.

13. Методика расчёта преобразователя, собранного по топологии sepic. [Электронный ресурс] URL: https://radiohlam.ru/sepic_raschet/#calc (дата обращения: 31.01.2025).

14. Образцов А. Схемотехника DC/DC-преобразователей / А. Образцов, С. Образцов // Современная электроника. 2005. № 3. С. 36 – 43.

15. Рентюк В. Компьютерное проектирование DC/DC- преобразователей на элементной базе компании Maxim // Компоненты и технологии. 2016. № 2(175). С. 81-86. EDN VGHSRF.

16. Савелов А.А. Расчет импульсных источников питания устройств авионики. Москва: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2015. 96 с. EDN XMMDCP.

17. Стабилизация напряжения статическим тиристорным компенсатором с нечётким регулятором в системе с переменной нагрузкой / А.В.

Купова, В.А. Соловьев, А.А. Светлаков, В.А. Челухин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 7(55). С. 48-57. DOI 10.17084/20764359-2021-55-48. EDN FJIBRF.

18. Табаров Б.Д. Исследование непрерывного регулирования реактивной мощности конденсаторной установки при дискретном повышении нагрузки / Б.Д. Табаров, З.И. Одинаев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 1(65). С. 25-30. DOI 10.17084/20764359-2023-65-25. EDN ZIKYMS.

19. Табаров Б.Д. Исследование управления семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при дискретном регулировании реактивной мощности / Б.Д. Табаров, В.А. Соловьев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 5(69). С. 61-66. DOI 10.17084/20764359-2023-69-61. EDN ELDJHR.

20. Теория работы и расчёт неизолированного повышающего преобразователя. Часть 2. Анализ работы и расчёт элементов boost-конвертера. [Электронный ресурс] URL: https://radiohlam.ru/boost2 (дата обращения: 31.01.2025).

21. Фролов А.В. Исследование особенностей работы мостового выпрямителя с активно-ёмкостной нагрузкой / А.В. Фролов, А.В. Боцманов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2024. № 3(75). С. 20-31. EDN TFMELQ.

22. Фролов А.В. Особенности работы однофазных выпрямителей с ёмкостным фильтром / А.В. Фролов, П.А. Овчаренко, А.В. Васильев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 345-353. DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-345-346. EDN BDHHXA.

23. Экспериментальное исследование преобразования энергии суточного перепада температур / В. А. Челухин, А. В. Васильев, Е. В. Абрамсон, З. А. Пьей // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 5(69). С. 43-52. DOI 10.17084/20764359-2023-69-43. EDN NQFOQO.

Фролов Алексей Валерьевич, канд. техн. наук, доцент, AFrolov.kms@mail.ru, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Петраков Никита Алексеевич, сотрудник, peit@knastu.ru, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Голубева Виктория Игоревна, сщтрудник, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

RESEARCH OF THE PULSE VOLTAGE CONVERTER CAPACITIVE FILTER

A.V. Frolov, N.A. Petrakov, V.I. Golubeva

The paper presents the results of theoretical calculation and SimInTech modeling of the operation of a capacitive filter with a half-wave rectifier in single-stroke forward and fly-

back voltage converters, as well as in a pulse-width DC voltage regulator. There are presented the dependences of the filter output voltage and ripple factor on the input signal parameters and the filter capacitance and load resistance. There are proposed the formulas for these dependencies. There are shown the possibility of using a capacitive filter instead of a traditional LC filter in a pulse voltage converter.

Key words: DC-DC converter, capacitive filter, ripple factor, average voltage, pulse width modulation, simulation, SimInTech.

Frolov Aleksei Valerevich, candidate of technical sciences, docent, Afrolov.kms@mail.ru, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure State University,

Petrakov Nikita Alekseevich, employee, peit@knastu.ru, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure State University,

Golubeva Victoria Igorevna, employee, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure State University

УДК 621.316.71; 681.58
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-30-31

СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ТИПА МОТОР-КОЛЕСО С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

С.П. Черный, М.А. Лямин, А.В. Бузикаева, С.А. Пячин

В работе описана разработка нечёткой системы согласованного управления электроприводами типа мотор-колесо роботизированной транспортной платформы с учётом перекрёстных взаимосвязей. Приведено описание входных и выходных лингвистических переменных нечётких регуляторов. Проведены эксперименты с различными настройками нечёткого вывода регуляторов. Эксперименты проводились с различными типами сигналов задания и с различными возмущающими воздействиями.

Ключевые слова: электропривод, нечёткий логический регулятор, согласованное управление, роботизированная транспортная платформа.

В современном мире значительную актуальность имеют системы транспортировки на базе транспортных роботизированных платформ различной конфигурации и характеристик. Они могут использоваться как для автоматизации складских помещений, так и для доставки технологического оборудования в труднодоступные места для автоматизации различных технологических процессов. Такого вида роботизированные платформы отличаются тем, что имеют в своей конструкции группы взаимосвязанных электроприводов. Одной из таких платформ является робототехнический транспортный комплекс (РТК), описанный ранее в статьях [1-4].

В рамках указанных статей авторами были описаны принципы построения комплекса, основные выполняемые задачи и подходы к построению классических систем управления группой взаимосвязанных электроприводов типа мотор-колесо, обеспечивающей движение РТК. В данной статье будет исследоваться внедрение в систему согласованного управления регуляторов, использующих аппарат нечёткой логики.

Разработка системы согласованного нечёткого регулирования. Развивая полученную систему согласованного управления, заменим классические регуляторы усредненного и относительного движения на нечеткие логические регуляторы (НЛР). В рамках исследования системы были синтезированы НЛР с двумя вариантами реализации алгоритма нечеткого вывода: Мамдани и Сугено. При расчете классических регуляторов для усредненного и относительного движений расчет выполняется по одинаковым алгоритмам [5-8], поэтому и с НЛР описание вводимого в систему интеллектуального модуля будет приводиться один раз на каждый тип логического вывода.

НЛР, реализующий алгоритм нечеткого вывода Мамдани на входе имеет лингвистическую переменную «PosError», выход формализуется лингвистической переменной «ErrorSpeedChange».

Лингвистическая переменная «PosError» формализует понятие входного сигнала НЛР, которым является ошибка усредненного положения в случае регулятора усредненного движения и разница между положениями двигателей в случае регуляторов относительного движения. Область определения переменной – диапазон [-1; 1]. В этой области распределены пять функций принадлежности нечетких переменных, среди которых mf1 – z-образная функция, mf5 – s-образная, mf2, mf3, mf4 – треугольного вида.

Лингвистическая переменная «ErrorSpeedChange» формализует понятие выходного сигнала НЛР – скорость изменения ошибки усредненного положения в случае регулятора усредненного движения и скорость изменения разницы между положениями двигателей в случае регуляторов относительного движения. Область определения переменной – диапазон [-1.5; 1.5]. В этой области распределены пять функций принадлежности нечетких переменных треугольного вида [9-12].

Нечеткая продукционная база знаний НЛР формируется с применением общепринятых методик и будет состоять из пяти продукционных правил.

НЛР, реализующий алгоритм нечеткого вывода Сугено на входе имеет лингвистическую переменную «PosError», выход формализуется лингвистической переменной «ErrorSpeedChange».

Лингвистическая переменная «PosError» формализует понятие входного сигнала НЛР, которым является ошибка усредненного положения в случае регулятора усредненного движения и разница между положениями двигателей в случае регуляторов относительного движения. Область определения переменной – диапазон [-1.5; 1.5]. В этой области распределены пять функций принадлежности нечетких переменных, среди которых

mf1 – z-образная функция, mf5 – s-образная, mf2, mf3, mf4 – треугольного вида.

Лингвистическая переменная «ErrorSpeedChange» формализует понятие выходного сигнала НЛР – скорость изменения ошибки усредненного положения в случае регулятора усредненного движения и скорость изменения разницы между положениями двигателей в случае регуляторов относительного движения. Область определения переменной – диапазон [-1.5; 1.5]. В этой области распределены пять функций принадлежности нечетких переменных в виде константных значений [13-16].

Заменяя классические регуляторы на НЛР, получим систему нечеткого согласованного управления, представленную на рис. 1.

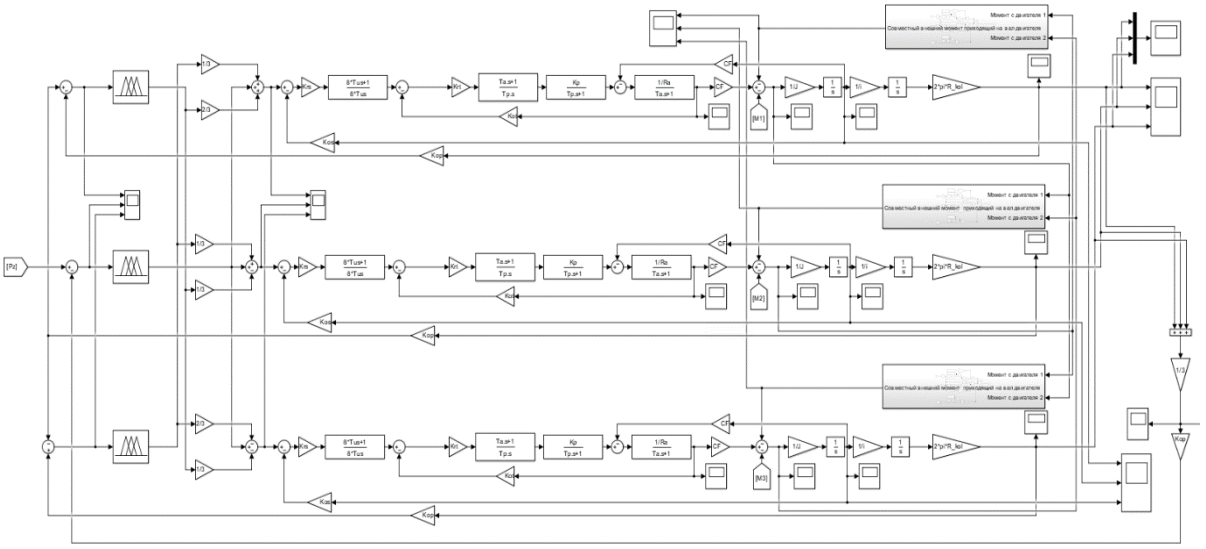


Рис. 1. Структурная схема системы нечеткого согласованного управления взаимосвязанными электроприводами типа мотор-колесо

Исследуя систему нечеткого согласованного управления с различными вариантами алгоритма нечеткого вывода, было подано задающее воздействие в виде единичного ступенчатого сигнала:

Рис. 2-а – реакция системы на единичный ступенчатый сигнал задания с алгоритмом вывода НЛР Мамдани;

Рис. 2-б – реакция системы на единичный ступенчатый сигнал задания с алгоритмом вывода НЛР Сугено.

При исследовании многодвигательной системы интерес представляет ее реакция на рассогласованное возмущающее воздействие для различных элементов систем электроприводов [17-20]. Рассогласование может быть трех типов: рассогласованное по времени подачи возмущения, по значению подаваемого возмущения и смешанное. На рис. 2-в, 2-г, 3 представлены переходные характеристики системы с реакцией на различные типы нагрузки при единичном ступенчатом сигнале задания:

2-в – Реакция системы на рассогласованное по времени возмущение с алгоритмом вывода НЛР Мамдани;

2-г – Реакция системы на рассогласованное по времени возмущение с алгоритмом вывода НЛР Сугено;

3-а – Реакция системы на рассогласованное по значению возмущение с алгоритмом вывода НЛР Мамдани;

3-б – Реакция системы на рассогласованное по значению возмущение с алгоритмом вывода НЛР Сугено;

3-в – Реакция системы на смешанное рассогласованное возмущение с алгоритмом вывода НЛР Мамдани;

3-г – Реакция системы на смешанное рассогласованное возмущение с алгоритмом вывода НЛР Сугено.

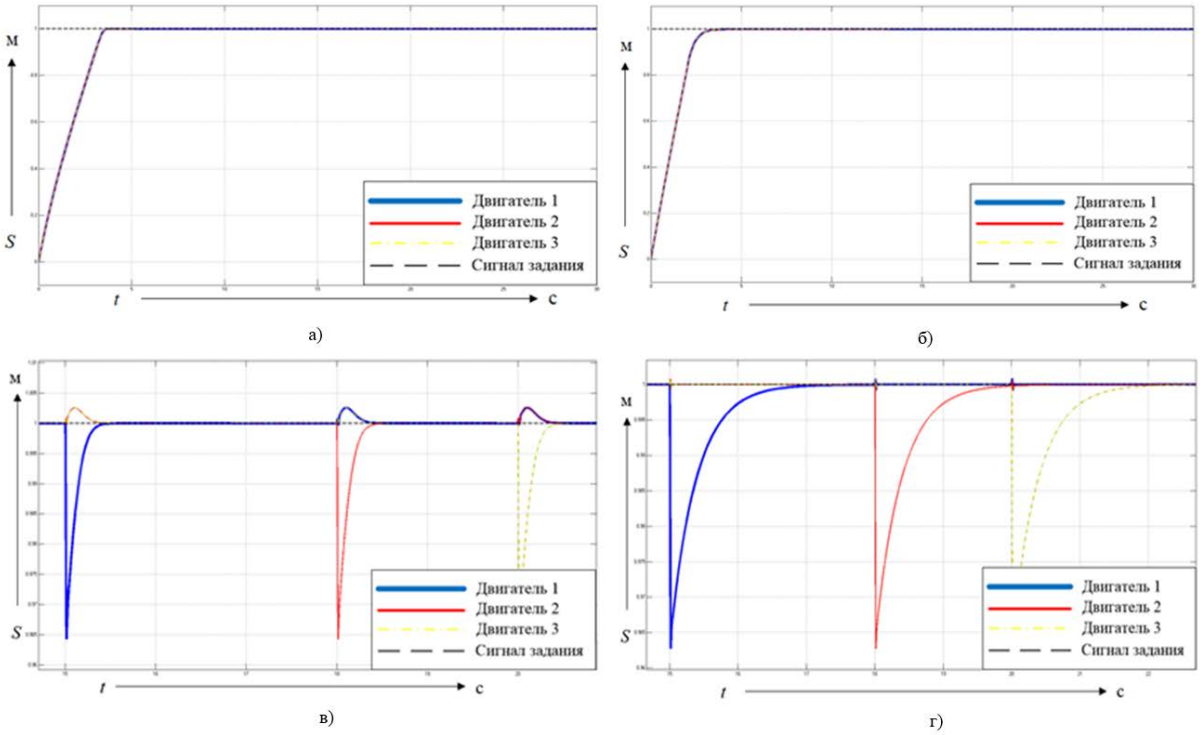


Рис. 2. Реакции системы нечеткого согласованного управления при единичном ступенчатом сигнале задания

Далее рассмотрена реакция системы нечеткого согласованного управления группой электроприводов на задающий сигнал синусоидального вида:

Рис. 4-а – реакция системы на синусоидальный сигнал задания с алгоритмом вывода НЛР Мамдани;

Рис. 4-б – реакция системы на синусоидальный сигнал задания с алгоритмом вывода НЛР Сугено.

Проанализируем поведение взаимосвязанной системы электроприводов типа мотор-колесо аналогичный с единичным ступенчатым сигналом задания и подадим различные типы возмущающего воздействия с учетом различных вариантов алгоритма нечеткого вывода:

4-в – Реакция системы на рассогласованное по времени возмущение с алгоритмом вывода НЛР Мамдани;

4-г – Реакция системы на рассогласованное по времени возмущение с алгоритмом вывода НЛР Сугено;

5-а – Реакция системы на рассогласованное по значению возмущение с алгоритмом вывода НЛР Мамдани;

5-б – Реакция системы на рассогласованное по значению возмущение с алгоритмом вывода НЛР Сугено;

5-в – Реакция системы на смешанное рассогласованное возмущение с алгоритмом вывода НЛР Мамдани;

5-г – Реакция системы на смешанное рассогласованное возмущение с алгоритмом вывода НЛР Сугено.

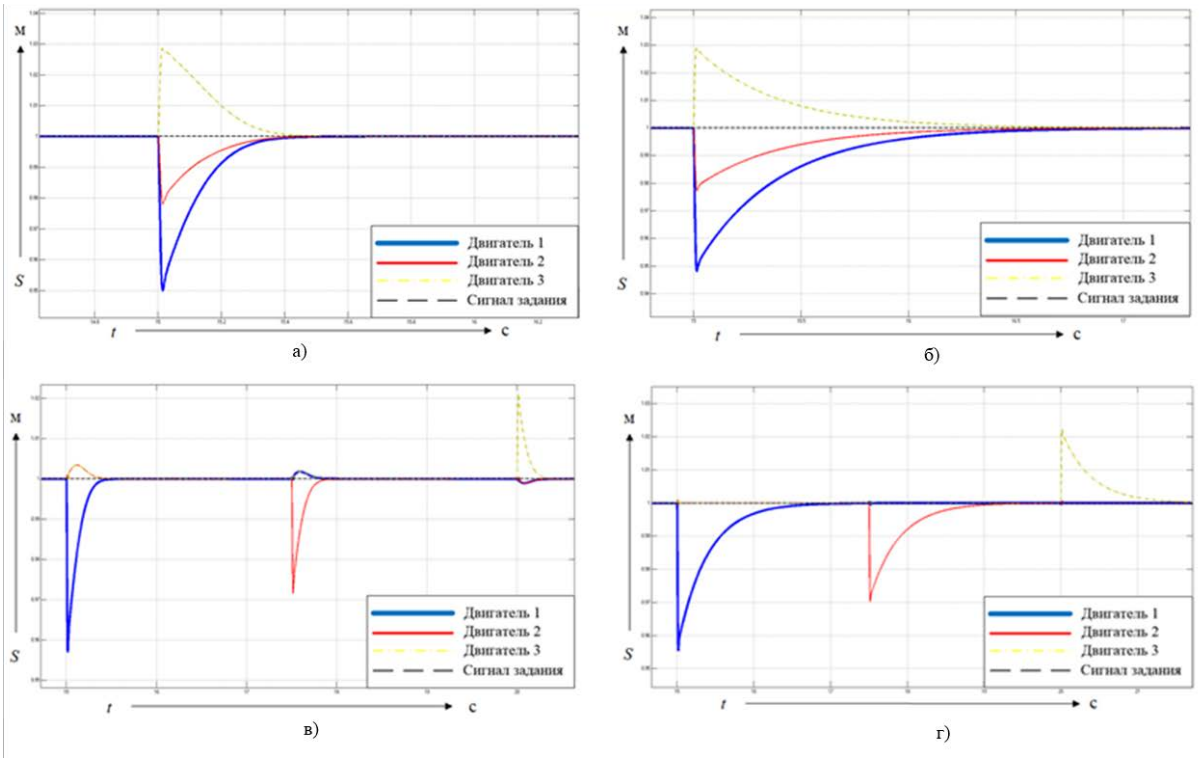


Рис. 3. Реакции системы нечеткого согласованного управления на возмущающие воздействия при единичном ступенчатом сигнале задания

На основании представленных результатов моделирования можно сделать вывод, что при подаче единичного ступенчатого управляющего сигнала время переходного процесса было снижено на 76.73% в случае использования регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода внутреннего каскада Мамдани и на 69.7% в случае использования регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода внутреннего каскада Сугено; время компенсации возмущения было снижено на 95% в случае использования регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода внутреннего каскада Мамдани и на 80% в случае использования регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода внутреннего каскада Сугено;

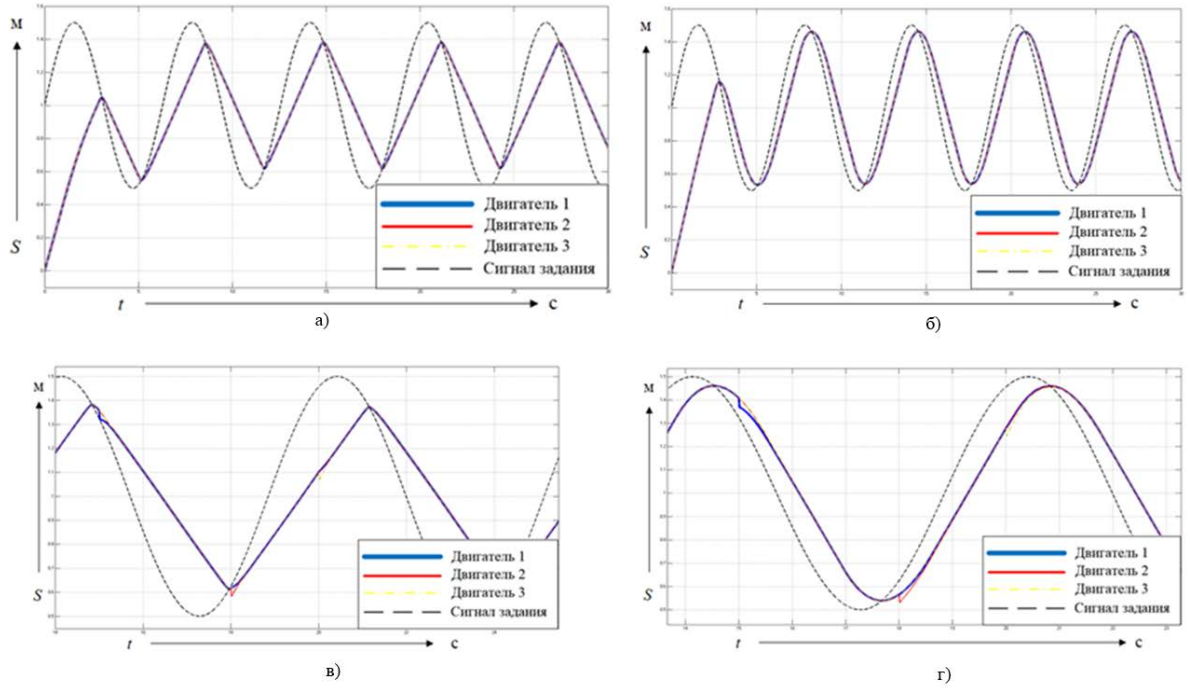


Рис. 4. Реакции системы нечеткого согласованного управления при синусоидальном сигнале задания

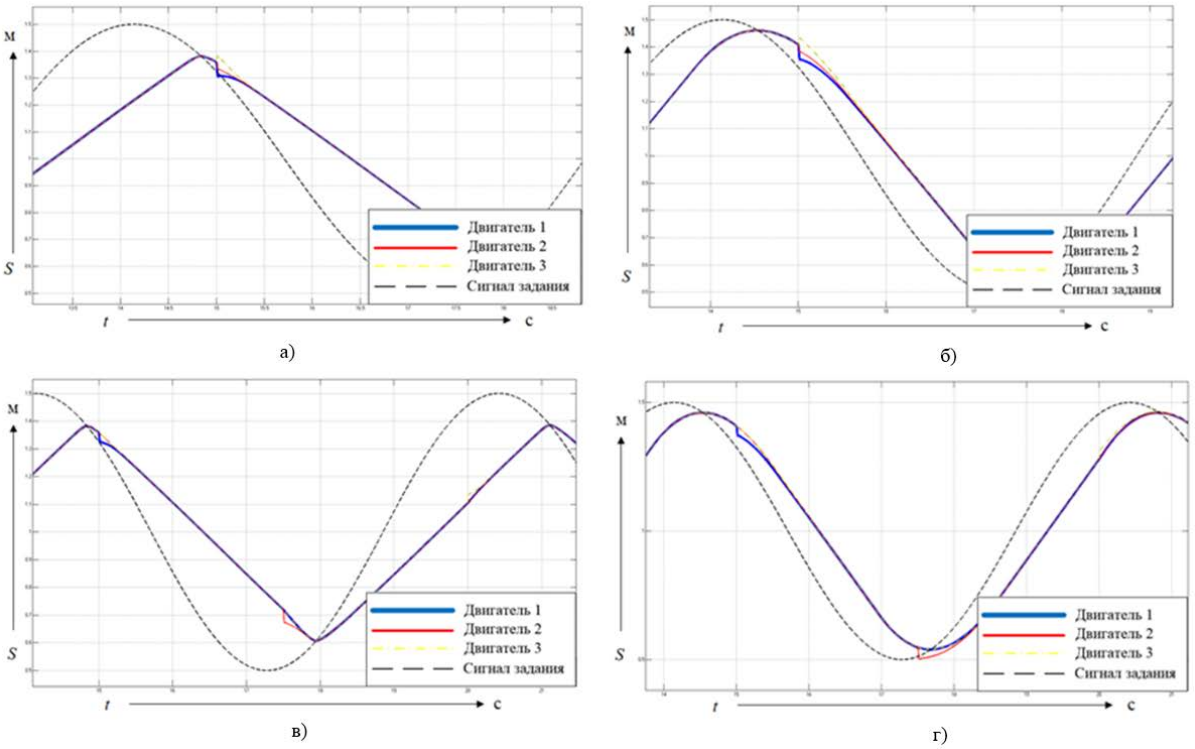


Рис. 5. Реакции системы нечеткого согласованного управления на возмущающие воздействия при синусоидальном сигнале задания

При подаче синусоидального управляющего сигнала запаздывание по фазе было снижено на 41.1% в случае использования регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода Мамдани и на 66.3% в случае использования регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода Сугено; отставание по амплитуде было снижено на 59.4% в случае использования регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода Мамдани и на 87.5% в случае использования регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода Сугено; время компенсации возмущения было снижено на 93.75% в случае использования регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода Мамдани и на 75% в случае использования регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода Сугено.

Такое повышение основных показателей качества регулирования системы управления электроприводами обусловлено этапом дефаззификации, основанным на полиномиальной зависимости предпосылок правил агрегированного нечеткого множества.

Заключение. В рамках данной работы представлена разработка нечёткой системы согласованного управления электроприводами типа мотор-колесо универсальной роботизированной транспортной платформы для выполнения различных технологических операций в труднодоступных местах. Представлена различная настройка вывода нечётких логических регуляторов усреднённого и относительного движений. С использованием программного обеспечения Mathlab Simulink построена модель системы нечеткого согласованного управления электроприводами типа мотор-колесо с учётом перекрёстных взаимосвязей. Проведены эксперименты с различными настройками регуляторов. Полученные в ходе моделирования переходные характеристики подтверждают стабильность работы системы и демонстрируют ее способность компенсировать различные возмущающие воздействия, в зависимости от характера нагрузки, при различных управляющих сигналах.

Дальнейшее развитие предложенной интеллектуальной системы, к примеру, внедрение дополнительных каскадов нечёткого регулятора позволит регулировать не только непосредственные параметры электроприводов, но и внешние параметры транспортной платформы.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2024-2026 годы по теме "Автоматизация авиастроительных производств с применением средств промышленной робототехники" и при поддержке гранта Умник №19419ГУ/2024 от 30.05.2024 "Разработка робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов".

Список литературы

1. Лямин М.А. Робототехнический транспортный комплекс для магистральных трубопроводов / М.А. Лямин, С.П. Черный // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы VI Всероссийской национальной научной конференции

молодых ученых. В 3-х частях, Комсомольск-наАмуре, 10–14 апреля 2023 года. Том Часть 1. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. С. 235-238. EDN UNDHOT.

2. Лямин М.А. Исследование взаимосвязей в многодвигательных системах на примере робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов / М. А. Лямин, С. П. Черный // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых. В 3-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2024 г. Том Часть 1. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024. С. 199-201.

3. Лямин М.А. Система совместного управления электроприводами моторколесо робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов / М.А. Лямин, С.П. Черный // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 7(71). С. 66-73. DOI 10.17084/20764359-2023-71-66. EDN GESPNF.

4. Лямин М.А. Система согласованного управления положением взаимосвязанных электроприводов роботизированной транспортной платформы / М.А. Лямин, С.П. Черный // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4(1). С. 331-340.

5. Стельмащук С.В. Система подчинённого управления скалярным частотно-регулируемым многодвигательным электроприводом с независимым соединением асинхронных двигателей / С.В. Стельмащук, И.Ю. Лакеев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 7(71). С. 57-65. DOI 10.17084/20764359-2023-71-57. EDN RFNQDD.

6. Стельмащук С.В. Подчиненное управление многодвигательным электроприводом с последовательным соединением двигателей постоянного тока с независимым возбуждением / С. В. Стельмащук, А. А. Гурулев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 403-411. DOI 10.24412/2071-6168-2024-1-403-404. EDN IWEHKF.

7. Стельмащук С.В. Разработка системы управления электропривода насоса для гидравлической сети с учётом инерционной составляющей давления / С.В. Стельмащук, С.Д. Демин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 3(59). С. 78-84. DOI 10.17084/20764359-2022-59-78. EDN SATPBM.

8. Рубашкин И.Б. Адаптивные системы взаимосвязанного управления электроприводами. Ленинград: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1975. 160 с.

9. Черный С.П. Моделирование многокаскадного нечеткого логического регулятора для стабилизации модульного тралового механизма / С.П. Черный, В.Н. Хрульков, Б.Я. Мокрицкий // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 11. С. 126-132. DOI 10.17513/snt.40218. EDN KMGSTW.

10. Черный С.П. Моделирование многокаскадного нечёткого логического регулятора для управления многосоставным траловым механиз-

мом на основе оператора сложения / С.П. Черный, В.Н. Хрульков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 5(69). С. 53-60. DOI 10.17084/20764359-2023-69-53. EDN BKIWEA.

11. Максимова Н.А. Применение технологии многокаскадного нечеткого управления для электроприводов постоянного тока / Н.А. Максимова, С.П. Черный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2020. № 4(25). С. 50-54. EDN KGIXBI.

12. Черный С.П. Моделирование интеллектуальной системы управления с многокаскадным нечётким ПИД-регулятором / С.П. Черный, Е.Н. Землянская, А.С. Филатова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2015. Т. 1, № 4(24). С. 15-21. EDN VZAGLL.

13. Khrulkov V. Method of Implementing a Fuzzy Logic Controller by Hardware / V. Khrulkov, S. Vasilchenko, S. Cherny // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. Vladivostok, 2020. P. 9271539. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271539. EDN RMKKKF.

14. Cherniy S.P. Modeling of an Advanced Fuzzy Logic Controller with Elementary Links in the Internal Cascade / S. P. Cherniy, V. I. Susdorf, A. V. Buzikayeva // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. Vladivostok, 2020. P. 9271136. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271136. EDN LQOSKP.

15. Дубовик М.Е. Исследование электропривода переменного тока с управлением по цепи ротора / М.Е. Дубовик, В.А. Соловьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 390-399. DOI 10.24412/2071-6168-2024-4-390-391. EDN CSFOSV.

16. Соловьев В.А. Электропривод на базе машины двойного питания с улучшенными энергетическими характеристиками / В.А. Соловьев, М.Е. Дубовик // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 4-9. DOI 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-4-9. EDN PUVLGM.

17. Лисин С.Л. Повышение быстродействия следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2012. № 4 (36). Самара: СамГТУ, 2012. С. 173 - 181.

18. Стариков А.В. Следящий электропривод с асинхронным исполнительным двигателем / А.В. Стариков, Д.Н. Джабасова // Известия высших учебных заведений «Электромеханика», № 5. 2014. С. 72 - 75.

19. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1990. 304 с.

20. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; Под ред. В.М. Терехова. М.: Издательский центр «Академик», 2005. 304 с.

Черный Сергей Петрович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, kepapu@knastu.ru, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Лямин Михаил Андреевич, аспирант, lyamin.ma@email.knastu.ru, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Бузикаева Алина Валерьевна, ст. преподаватель, epapu@knastu.ru, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Пячин Сергей Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой, sapjachin@festu.khv.ru, Россия, Хабаровск, Дальневосточный государственный университет путей сообщения

COORDINATED CONTROL OF ELECTRIC DRIVES OF THE MOTOR-WHEEL TYPE USING THE THEORY OF FUZZY SETS

M.A. Lyamin, S.P Cherniy, A. V. Buzikayeva, S.A. Pyachin

The paper describes the development of a fuzzy system for coordinated control of electric drives of the motor-wheel type of a robotic transport platform taking into account cross-relationships. A description of the input and output linguistic variables of fuzzy controllers is given. Experiments with various settings of the fuzzy output of controllers are conducted. The experiments were conducted with various types of task signals and with various disturbing effects.

Key words: electric drive, fuzzy logic controller, coordinated control, robotic transport platform.

Cherniy Sergey Petrovich, doctor of technical sciences, docent, head of the department, kepapu@knastu.ru, Russia, Komsomolsk-na-Amure, Komsomolsk-na-Amure State University,

Lyamin Mikhail Andreevich, postgraduate, lyamin.ma@email.knastu.ru, Russia, Komsomolsk-na-Amure, Komsomolsk-na-Amure State University,

Buzikayeva Alina Valerievna, senior lecturer, epapu@knastu.ru, Russia, Komsomolsk-na-Amure, Komsomolsk-na-Amure State University,

Pyachin Sergey Anatolievich, doctor of physico-mathematical sciences, professor, head of the department, sapjachin@festu.khv.ru, Russia, Khabarovsk, Far Eastern State Transport University

УДК 629.7.062
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-40-41

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИНТОМОТОРНОЙ ГРУППЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

В.В. Солецкий, Д.А. Киба, М.А. Бородин

Рассмотрены особенности разработки стенда для определения характеристик винтомоторной группы двухсредных беспилотных летательных аппаратов в водной и воздушной средах. Приведены конструктивные решения и этапы проектирования стенда, включая применение тензодатчиков и микроконтроллеров для измерения тяги и реактивного момента. Основой методики исследования стало использование стандартных элементов мультироторных БПЛА для обеспечения точности результатов.

Ключевые слова: двухсредный, БПЛА, винтомоторная группа, воздушный винт, стенд для испытаний, характеристики двигателей.

В настоящее время отрасль беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является одной из самых перспективных и активно развивается. Высокий темп роста отрасли приводит к появлению новых типов БПЛА. Один из них – двухсредные БПЛА, способные как к воздушному полету, так и к перемещению под водой. В подводном положении могут применяться как специальные движители для водной среды (винты, водомёты), так и воздушные винты, которые служат для полёта в воздухе. Использование одного и того же движителя для воздуха и для воды предпочтительнее, поскольку позволяет упростить конструкцию двухсредного БПЛА и снизить его массу по сравнению с решением, в котором для разных сред используются разные движители.

Однако в настоящее время не исследованы режимы работы винтомоторных групп БПЛА с воздушными винтами в водной среде и во время перехода между воздушной и водной средами. Эти исследования требуются, во-первых, для подтверждения практической возможности использования воздушного винта в воде, во-вторых – для определения механических и электрических характеристик винтомоторной группы, в-третьих, для определения ограничений, которые накладываются на использование воздушного винта в воде. Для проведения таких исследований необходима разработка и изготовление соответствующего лабораторного стенда, способного получить корректные характеристики винтомоторной группы, которые будут использованы при проектировании системы управления двухсредных БПЛА.

Аналоги. Несмотря на возрастающую актуальность задачи создания двухсредных БПЛА, оборудование, которое позволяет определять характеристики винтомоторных групп при работе в различных средах, не представлено на рынке. Однако известно несколько патентов на конструкцию стендов для исследования винтомоторной группы в воздушной среде. Рас-

смотрим из них несколько конструктивных и технических решений, которые можно было бы приспособить к использованию в двух средах.

Патент на изобретение RU 186022 U1, опубликованный 26.12.2018 г. «Стенд для испытаний подъемной тяги винтов беспилотного летательного аппарата». Стенд включает в себя защитную раму, двуплечий рычаг в виде прямоугольной балки с закрепленным на нем электродвигателем, тензодатчик, установленный на другом конце двуплечего рычага, аккумулятор и контроллер, которые закреплены на двуплечем рычаге, персональный компьютер. Недостатком конструкции стенда является его громоздкость и способность определять только одну характеристику – тягу винтомоторной группы.

Патент на полезную модель RU 186209 U1, опубликованный 11.01.2019 г. «Устройство тестирования бесколлекторных электродвигателей беспилотных летательных аппаратов». Устройство содержит вычислительный модуль с программным обеспечением для воспроизведения программы испытаний и хранения результатов, модуль управления и регистрации характеристик, датчик оборотов винта, датчик тяги, датчик потребляемого электродвигателем тока, регулятор оборотов, датчик напряжения питания регулятора оборотов, электродвигатель с винтом. В данном патенте устройство представлено как набор датчиков, связанных линиями связи без описания его технической реализации, кроме того, устройство не обладает возможностью определения момента двигателя.

Патент на изобретение RU 2739905 C1 опубликованный 29.12.2020 г. «Устройство автоматизации испытаний движителей автономных объектов». Устройство включает в себя вычислительный модуль с программным обеспечением, модуль управления и регистрации характеристик, датчик потребляемого электродвигателем тока, содержит не менее пяти датчиков тяги, размещенных на подвижных стойках параллельного манипулятора с октаэдральной компоновкой стоек с жестко закрепленными на нем электродвигателем с винтом, на приводном валу которого размещен датчик оборотов винта и датчик крутящего момента, а непосредственно на платформе в точках крепления подвижных стоек закреплены датчики вибрации. Основным недостатком стенда является необходимость установки датчика оборотов винта и датчика крутящего момента непосредственно на приводном валу. Данное решение требует удлинения приводного вала двигателя с последующей установкой на него воздушного винта, что отличается от стандартной установки винта непосредственно на двигатель, и может вести к несоответствию характеристик винтомоторной группы при стендовом исследовании и реальном использовании.

Существующие патенты на лабораторные стенды для исследования характеристик винтомоторных групп не приспособлены для работы в водной и воздушной среде, а также не обеспечивают комплексного измерения всех требуемых характеристик, а именно:

- тяга винтомоторной группы;
- момент двигателя (реактивный момент);

- скорость вращения винта (количество оборотов в минуту);
- напряжение в сети;
- сила тока на обмотках двигателя.

Это ведёт к необходимости разработки и изготовления стенда, который бы позволил проводить исследования характеристик различных винтомоторных групп на основе широкой линейки коллекторных или бесколлекторных электродвигателей с установленными на них воздушными винтами различной геометрии в водной и воздушной среде.

Конструкция стенда. Была предложена следующая конструкция стенда для определения тяговых характеристик винтомоторной группы БПЛА в разных средах (рисунок 1): На основании стенда 1 установлены два соосных вала 2, на каждом из которых размещены по два подшипника 3, установленные внутри разъемной качалки 4. Также внутри качалки проходит рычаг 5, с одной стороны жестко закреплённый с утяжелителем 6, установленном на тензодатчике измерения тяги 7, а с другой жестко закреплен с патроном 8, с закрепленным на нем датчиком движения 9. Внутри патрона на подшипниках установлен вал мотогондолы 10, который передает крутящий момент от установленной на мотогондоле винтомоторной группы 11 на лапку 12, фиксируемый тензодатчиком измерения момента 13.

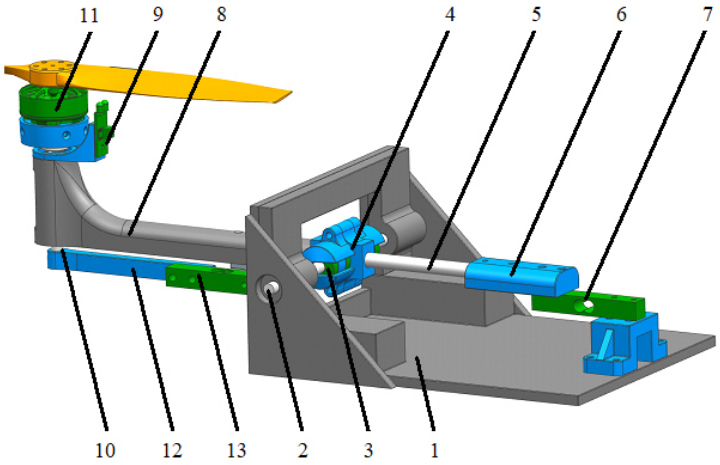


Рис. 1. 3D-модель стенда для определения тяговых характеристик винтомоторной группы БПЛА в разных средах: 1 – основание стенда; 2 – вал; 3 – подшипник; 4 – разъемная качалка; 5 – рычаг; 6 – утяжелитель; 7 – тензодатчик измерения тяги; 8 – патрон; 9 – датчик движения; 10 – вал мотогондолы; 11 – мотогондола с установленной на ней винтомоторной группой; 12 – лапка; 13 – тензодатчик измерения реактивного момента

При включении электродвигателя воздушный винт раскручивается и создаёт тягу, направленную вверх. Через рычаг за счет свободного вращения разъемной качалки усилие от винтомоторной группы прикладывается к тензодатчику измерения тяги. На рычаге предусмотрен регулируе-

мый утяжелитель, предназначенный для балансировки и исключения влияния гравитации на показания стенда. Во время вращения винта через вал мотогондолы реактивный момент передается на лапку, которая в свою очередь создает усилие, измеряемое соответствующим тензодатчиком. Скорость вращения винта (количество оборотов в минуту) измеряется оптическим датчиком оборотов.

Данная конструкция позволяет использовать широкую линейку коллекторных или бесколлекторных электродвигателей с установленными на них воздушными винтами различной геометрии. При этом используются штатные средства крепления винтов, а конструктивные элементы стенда имеют форму и размеры, близкие к форме и размерам лучей мультироторных БПЛА. Это позволяет получать результаты испытаний, максимально приближенные к работе винтомоторной группы в составе БПЛА.

На рисунке 2 приведена электрическая схема соединений стенда для определения тяговых характеристик винтомоторной группы БПЛА в разных средах. За управление режимами работы драйвера винтомоторной группы, а также за сбор и первичную обработку данных отвечает микроконтроллер в составе модуля Arduino. К этому модулю подключены датчики и исполнительные устройства. В качестве датчиков использованы: датчик тока, выполненный на основе шунтирующего резистора на 500 мкОм и операционного усилителя LM2904D, датчик напряжения, выполненный в виде делителя напряжения, датчик скорости вращения винта, основанный на инфракрасном модуле датчика препятствий Arduino YL-63, и тензометрические датчики YZC131, которые подключены к контроллерной плате через аналого-цифровые преобразователи HX-711, и используются для измерения тяги двигателя и момента винта.

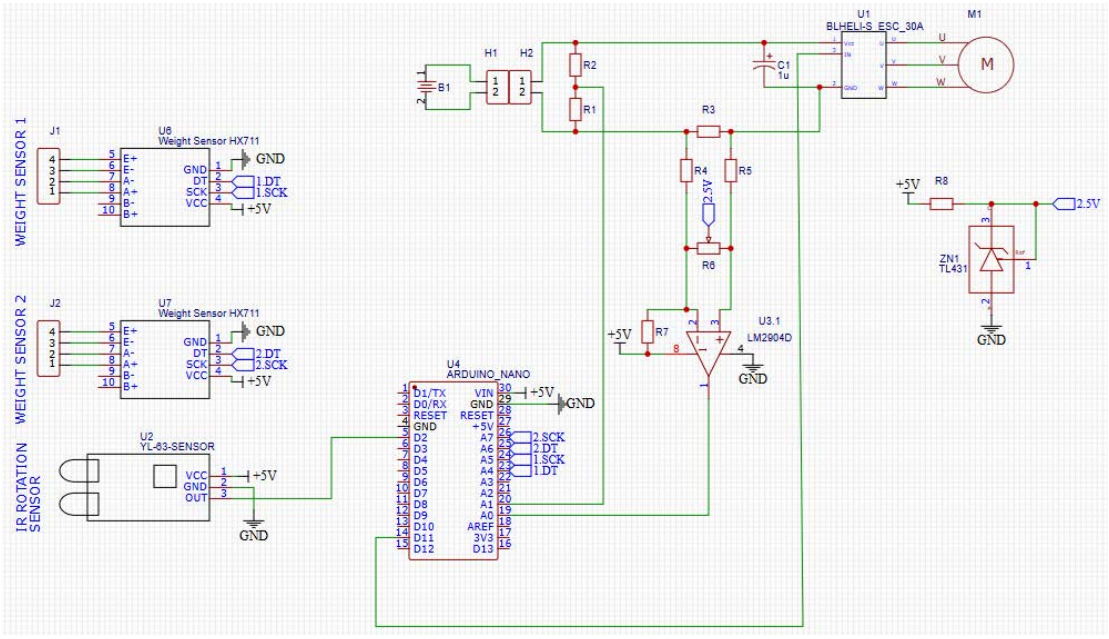


Рис. 2. Схема соединений стенда для определения тяговых характеристик винтомоторной группы БПЛА в разных средах

Датчик скорости вращения винта, основанный на инфракрасном модуле датчика препятствий Arduino YL-63, работает по принципу приёма инфракрасного излучения, отраженного от лопасти винта. Он установлен таким образом, чтобы излучение пересекалось с лопастями и в дальнейшем показатели датчика делятся на количество лопастей винта исследуемой винтомоторной группы.

Делитель напряжения обеспечивает согласование уровня измеряемого напряжения на входе регулятора скорости с входом аналого-цифрового преобразователя контроллера (до 5В). В качестве делителя напряжения используется потенциометр на 10 кОм. Это позволяет настраивать измерительную цепь на различные напряжения питания регулятора. Так, например, в случае работы винтомоторной группы от напряжения 24 В, положение движка потенциометра подобрано таким образом, чтобы обеспечить коэффициент деления равный 5.

Для сопряжения тензодатчиков с микроконтроллером используются специализированные микросхемы HX-711, объединяющие в себе аналого-цифровой преобразователь с встроенным источником тока для питания тензометрического моста. Это позволяет существенно упростить схему измерения тяги винтомоторной группы и момента винта и, одновременно, обеспечивает стабильность измерений.

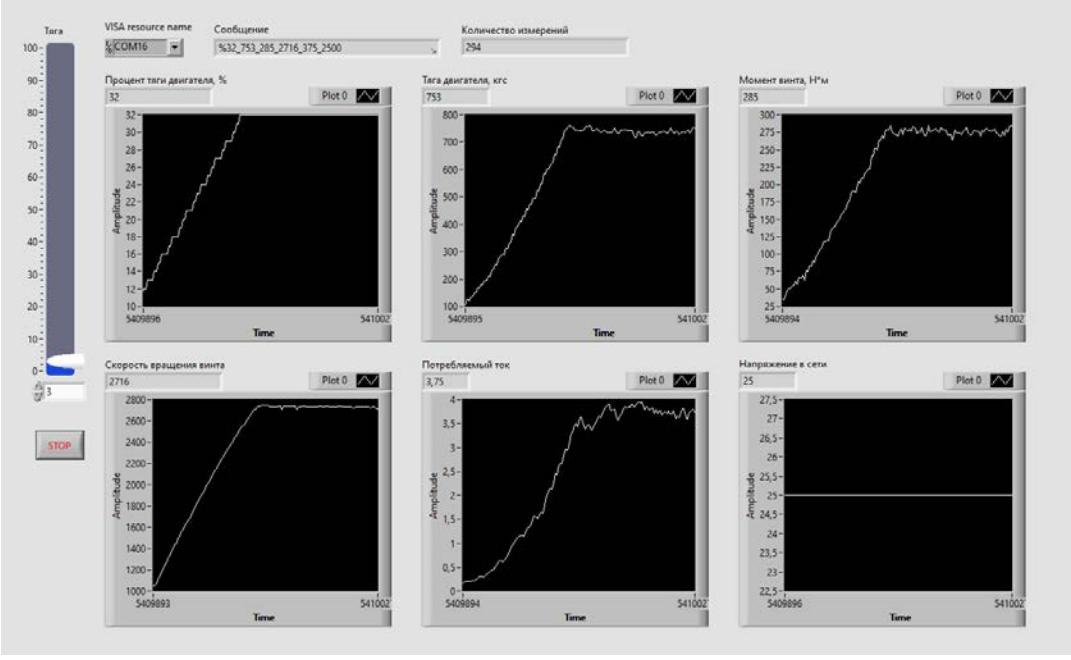


Рис. 3. Внешний вид виртуального прибора созданного в среде LabVIEW

К исполнительным устройствам в данном стенде относится регулятор скорости, подключенный к исследуемому бесколлекторному электродвигателю, питание которого осуществляется от аккумуляторной батареи.

Тип и номинальное напряжение аккумуляторной батареи, так же, как и максимальный ток на обмотках двигателя задается в зависимости от выбранного электродвигателя и регулятора оборотов.

Финальная обработка и визуализация результатов измерений, а также управление работой винтомоторной группы выполняются в виртуальном приборе, созданном в среде LabVIEW.

На рисунке 3 и 4 представлены основная панель и блок-схема виртуального прибора, созданного в среде LabVIEW.

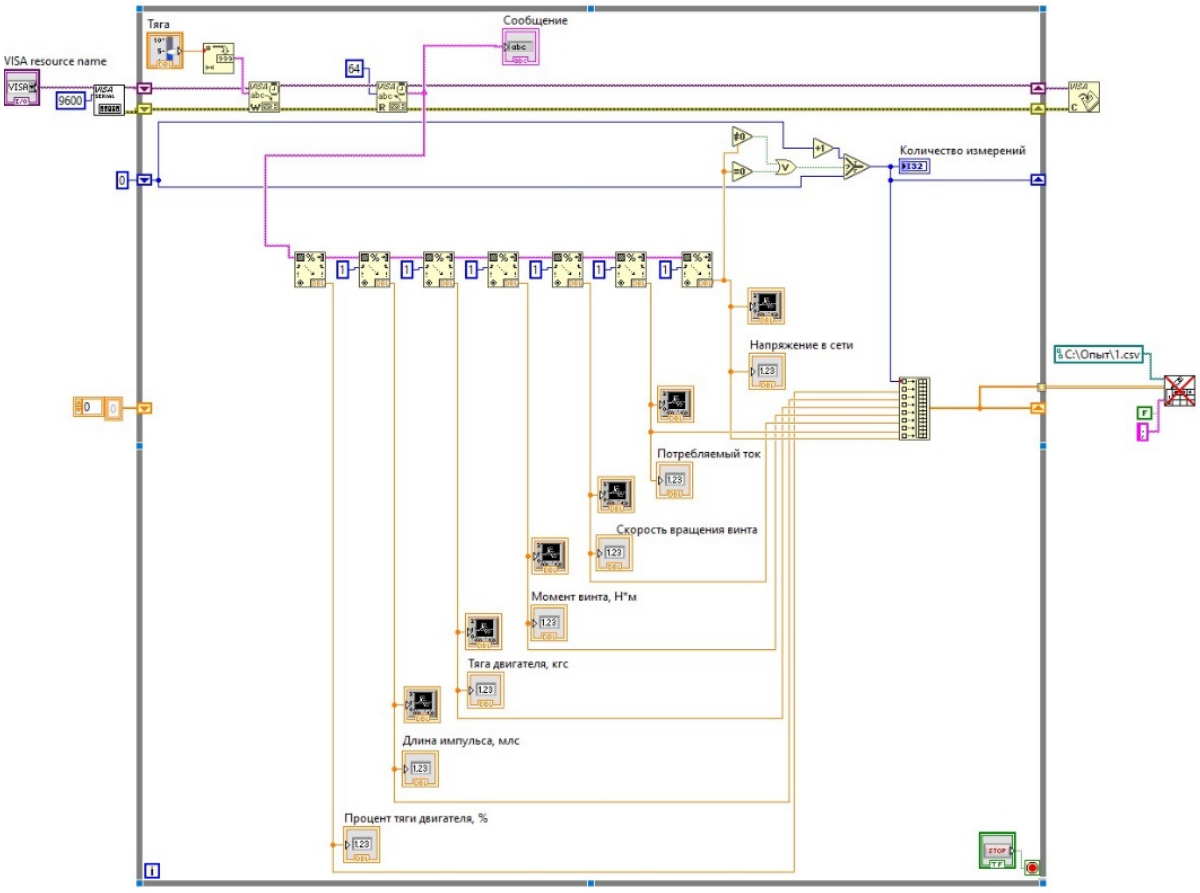


Рис. 4. Внешний вид виртуального прибора созданного в среде LabVIEW

Заключение. Разработанный лабораторный стенд позволит проводить исследования винтомоторных групп различных конфигураций в водной и воздушной среде. Данный лабораторный стенд можно будет использовать, как для определения механических и электрических характеристик конкретной винтомоторной группы в двух средах, так и для выявления зависимостей между характеристиками в водной и воздушной среде. Эти исследования позволят повысить эффективность разрабатываемых двухсредных аппаратов за счёт подбора энергоэффективной винтомоторной группы или для расчета тяго- и энерговооруженности аппарата при движении под водой.

Список литературы

1. Пат. RU186022U1 Российская Федерация, МПК G 01 L 5/13, B 64 C 11/00. Стенд для испытаний подъемной тяги винтов беспилотного лета-

тельного аппарата / В. Г. Гайнутдинов, И. Н. Абдуллин, М. И. Никитин, А. В. Торбин, А. Ф. Кучукбаев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ". № 2018131638; заявл. 03.09.18; опубл. 26.12.18; Бюл. № 16. 10 с.

2. Пат. RU2739905C1 Российская Федерация, МПК G 01 M 15/00, G 01 M 15/02, G 01 M 17/00, G 01 M 17/007. Устройство автоматизации испытаний движителей автономных объектов / О. В. Дрозд, Д. В. Капулин, П. В. Авласко, П. А. Русских ; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет". № 2020127772; заявл. 18.08.20; опубл. 29.12.20; Бюл. № 1.

3. Пат. RU186209U1 Российская Федерация, МПК G 01 M 15/00, H 02 K 11/20. Устройство тестирования бесколлекторных электродвигателей беспилотных летательных аппаратов / А. А. Гоголев, А. О. Лавров, А. С. Лялин ; заявитель и патентообладатель ФГУП "Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем". № 2018132104; заявл. 07.09.2018; опубл. 11.01.2019; Бюл. № 2.

4. Пат. RU187871U1 Российская Федерация, МПК B 64 C 27/08, G 01 M 9/06. Стенд для испытаний беспилотного летательного аппарата вертикального взлета и посадки на режиме висения и взлета / В. Г. Гайнутдинов, И. Н. Абдуллин, А. Л. Гусев, Р. Т. Ахметшин, Р. Р. Беков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ". № 2018131645; заявл. 12.11.18; опубл. 21.03.21; Бюл. № 27.

5. Давыдов И.Е. Системы управления ЛА: Электронное учебное пособие / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. И.Е. Давыдов. Электрон. текстовые и граф. дан. Самара, 2013. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

6. Суханов В.А. Автоматическое регулирование и оперативное управление на основе программно-технических комплексов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 88 с.

7. Коновалов Б.И., Лебедев Ю.М. Теория автоматического управления: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2010. 224 с.

8. Шалыгин А.С. Методы моделирования ситуационного управления движением беспилотных летательных аппаратов / РАРАН, А.С. Шалыгин, Л.Н. Лысенко, О.А. Толпегин; под ред. А.В. Ноздрачева и Л.Н. Лысенко; редкол. серии: В.М. Буренок (пред.) и др. М.: Машиностроение, 2012. 584 с.

9. Проектирование и испытание бортовых систем управления: учеб. пособие / под ред. А. С. Сырова. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. 344 с.

10. Попов П.М. Принципы построения систем автоматического управления применительно к управлению летательными аппаратами рекомендовано: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 52 с.

11. Авиационные системы радиоуправления / под ред. В.С. Вербы, В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2014. 376 с.

12. Бусурин В.И., Желтов С.Ю., Кудрявцев П.С. Системы визуального управления автономными беспилотными летательными аппаратами морского базирования. М.: Изд-во МАИ, 2016. 160 с.

13. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления; пер. с англ. Б. И. Копылова. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.

Солецкий Вячеслав Вадимович, инженер-технолог, soleckiy.vyacheslav@gmail.com, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Киба Дмитрий Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, dakiba@gmail.com, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Бородин Михаил Александрович, сотрудник, mikha_borodin@vk.com, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

DEVELOPMENT OF A STAND FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF AN AIRCRAFT'S PROPELLER GROUP IN VARIOUS ENVIRONMENTS

V.V. Soletsky, D.A. Kiba, M.A. Borodin

The features of the development of a stand for determining the characteristics of a propeller-driven group of two-medium unmanned aerial vehicles in water and air environments are considered. Constructive solutions and design stages of the stand are presented, including the use of load cells and microcontrollers for measuring thrust and reactive torque. The basis of the research methodology was the use of standard elements of multirotor UAVs to ensure the accuracy of the results.

Key words: two-medium, UAV, propeller group, propeller, test bench, engine characteristics.

Soletsky Vyacheslav Vadimovich, process engineer, soleckiy.vyacheslav@gmail.com, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State University,

Kiba Dmitry Anatolyevich, candidate of technical sciences, docent, dakiba@gmail.com, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State University,

Borodin Mikhail Alexandrovich, employee, mikha_borodin@vk.com, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State University

УДК 621.311.1
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-48-49

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ И ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В.М. Степанов, П.К. Сергеев

Рассмотрены преимущества технологии виртуального моделирования цифровых подстанцийс целью повышения улучшения процессов управления, защиты и автоматизации энергосистемы. Так же рассмотрен экономический эффект перехода к цифровым системам и положительное влияние технологии на снижение углеродного следа.

Ключевые слова: *цифровые подстанции, виртуализация, оптимизация, автоматизация, снижение углеродного следа.*

Энергетическая отрасль переживает масштабную трансформацию, вызванную ростом потребления энергии, изменением климата и внедрением возобновляемых источников. Цифровые подстанции являются ключевым элементом перехода к интеллектуальным (умным) сетям, обеспечивая возможности для автоматизации, повышения надежности и интеграции децентрализованных источников энергии. Одним из передовых направлений является виртуальноемоделирование цифровых подстанций, которое позволяет снижать затраты, увеличивать гибкость инфраструктуры и минимизировать воздействие на окружающую среду.

Виртуальное моделирование позволяет отказаться от медных кабелей в пользу оптоволоконных систем, которые более экологичны и дешевле в эксплуатации. По данным исследований, использование меди может стать серьезным источником углеродных выбросов к 2050 году, поэтому снижение ее потребления в инфраструктуре подстанций способствует достижению климатических целей [1].

Кроме того, централизованные программные платформы заменяют множество аппаратных устройств, что уменьшает физические размеры подстанций и затраты на обслуживание.

Виртуальное моделирование агрегирует функции таких устройств, как интеллектуальные электронные устройства (IED), в программные решения, что позволяет легко обновлять и адаптировать систему без необходимости замены физического оборудования. Это особенно важно для интеграции новых технологий в условиях быстрорастущего энергопотребления.

Благодаря высокоскоростным оптоволоконным каналам связи виртуальное моделирование подстанций открывает возможности для использования аналитики и глубокого обучения. Эти технологии позволяют оптимизировать управление спросом и предложением, снижая вероятность перегрузок и сбоев в энергосистеме.

Говоря о влиянии виртуализации цифровых подстанций на устойчивость энергосистемы, стоит упомянуть, что с ростом частоты экстремальных погодных явлений (ураганы, наводнения, аномальная жара) энергосистемы требуют механизмов, способных оперативно реагировать на внештатные ситуации. Виртуальное моделирование подстанций обеспечивает улучшенную диагностику и защиту, используя алгоритмы реального времени и системы централизованного управления. Например, системы централизованной защиты (CPC, Centralized Protectionand Control) способны обнаруживать высокоимпедансные замыкания за миллисекунды, предотвращая серьезные повреждения оборудования и длительные отключения энергии.

С увеличением доли ВИЭ (Возобновляемые Источники Энергии), таких как солнечная энергия и энергия ветра, энергосистемы сталкиваются с необходимостью адаптации к колебаниям производства и потребления. Виртуализация позволяет применять прогнозирующую аналитику для управления потоками энергии, оптимизируя баланс между генерацией и спросом. Например, технологии на основе искусственного интеллекта позволяют моделировать сценарии работы сети, предсказывать пиковые нагрузки и эффективно распределять ресурсы.

Традиционные системы защиты нередко имеют ограниченные возможности для быстрого восстановления работы сети после аварий. Напротив, цифровые подстанции с виртуализированными устройствами способны реализовывать алгоритмы FLISR (Fault Location, Isolation, and Service Restoration) и FDIR (Fault Detection, Isolation, and Restoration), которые значительно ускоряют процесс восстановления энергоснабжения. Это особенно важно для повышения надежности электросетей в регионах с высокой плотностью населения или сложным рельефом.

Надежная коммуникация внутри подстанции имеет решающее значение для обеспечения её устойчивости. Технологии, такие как High-availability Seamless Redundancy (HSR) и Parallel Redundancy Protocol (PRP), используются для предотвращения потерь пакетов данных и мгновенного восстановления связи при сбоях. Эти протоколы обеспечивают нулевое время восстановления сети, что особенно важно в условиях аварийной работы.

Цифровые подстанции интегрируют операционные и информационные технологии, что позволяет реализовывать продвинутые функции, такие как управление реактивной мощностью и снижение напряжения. Эти технологии способствуют повышению энергоэффективности и обеспечивают дополнительный уровень устойчивости сети к внешним воздействиям.

Модернизация цифровых подстанций с применением виртуального моделирования обеспечивает значительную экономию капитальных и операционных затрат. В условиях растущей децентрализации и перехода к возобновляемым источникам энергии этот подход позволяет снизить барьеры для внедрения инноваций и повысить надежность энергоснабжения.

Таким образом, виртуализация цифровых подстанций не только повышает надежность и безопасность энергосистемы, но и создает условия для её адаптации к современным вызовам и задачам. Дальнейшее развитие этих технологий будет определять направление энергетики в ближайшие десятилетия. Виртуальное моделирование цифровых подстанций представляет собой прорыв в области энергетики, обеспечивая экологическую устойчивость, экономическую эффективность и гибкость. Дальнейшее развитие этих технологий требует координации усилий научного сообщества, промышленных компаний и органов власти для создания интеллектуальных энергосетей будущего.

Список литературы

1. Digital Substations and Climate Resilience // Electric Power Research Institute (EPRI), 2023.

2. Point-to-Point Digital Secondary System Design, Вашингтонскийуниверситет, ESIC, 2023.

3. Gaspar C., Cruz R., Lam H., Simões R. Digital Substations: The Future of Grid Flexibility and Sustainability // IEEE Transactions on Smart Grid. 2023. Т. 14, №3. P. 512–520.

Степанов Владимир Михайлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, energy@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сергеев Павел Константинов, ассистент, pashaveegras@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

VIRTUAL MODELING OF DIGITAL SUBSTATIONS IN ORDER TO REDUCE COSTS AND INCREASE THE STABILITY OF THE ENERGY SYSTEM

V.M. Stepanov, P.K. Sergeev

The advantages of virtual modeling of digital substations are considered the purpose of increasing improvement of management, protection and automation of the energy system. The economic effect of transition to digital systems and the positive impact of the technology on a decrease in a carbon footprint is also considered.

Key words: digital substations, virtualization, optimization, automation, reduction of carbon footprint.

Stepanov Vladimir Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, the head of department, energy@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Sergeev Pavel Konstantinov, assistant, pashaveegras@mail.ru, Russia, Tula, Tula state University

УДК 621.3.079
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-51-52

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРЕЦИЗИОННЫХ СТАНКОВ С СИНХРОННЫМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

И.Ф. Байбиков, А.В. Стариков

Статья посвящена разработке следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем для прецизионных станков, обладающего повышенным быстродействием при отработке управляющих воздействий. Приведены функциональная и структурная схемы предлагаемого следящего электропривода, а также передаточные функции замкнутых контуров. Разработана методика параметрического синтеза регуляторов, обеспечивающая повышение быстродействия следящего электропривода. Приведены результаты компьютерного моделирования, показывающие достижимое быстродействие предлагаемого следящего электропривода.

Ключевые слова: следящий электропривод, синхронный двигатель, прецизионный станок, параметрический синтез.

Современные следящие электроприводы с синхронными исполнительными двигателями в основном построены по принципу подчиненного регулирования координат и имеют три контура регулирования: тока, скорости и положения [1]. Основной недостаток таких следящих систем является низкое быстродействие, характеризуемое временем переходного процесса порядка 1 – 2 с. Существуют также работы [2], посвященные повышению быстродействия следящих электроприводов с синхронными исполнительными двигателями за счет другого структурного построения и позволяющего достичь времени переходного процесса порядка 0,07 с. Однако, они требуют кардинальных изменений в технической реализации следящего электропривода.

Целью настоящего исследования является дальнейшее повышение быстродействия следящего электропривода при минимизации затрат на техническую реализацию.

Решение задачи. Для решения поставленной задачи предлагается следующее функциональное построение следящего электропривода, содержащего блок задания, интегральный (И), пропорциональный (П) и пропорционально-дифференциальный (ПД) регуляторы, пропорциональное звено, регулируемый электропривод, исполнительный механизм и датчик положения (рис. 1).

Предположим, что регулируемый электропривод построен с синхронным исполнительным двигателем построен по принципу векторного управления и имеет следующую структурную схему (рис. 2) [3]. В системе векторного управления используется замкнутый контур регулирования проекции I_{1d} тока статора на вращающуюся вместе с ротором систему координат $0dq$ с регулятором $W_{pm}(p)$.

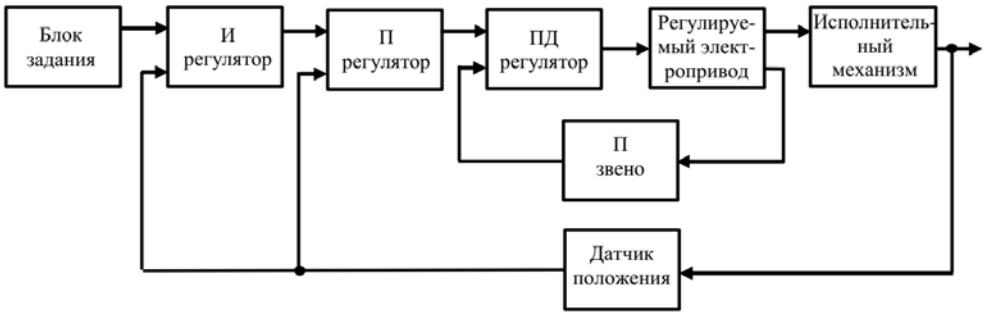


Рис. 1. Функциональная схема предлагаемого следящего электропривода

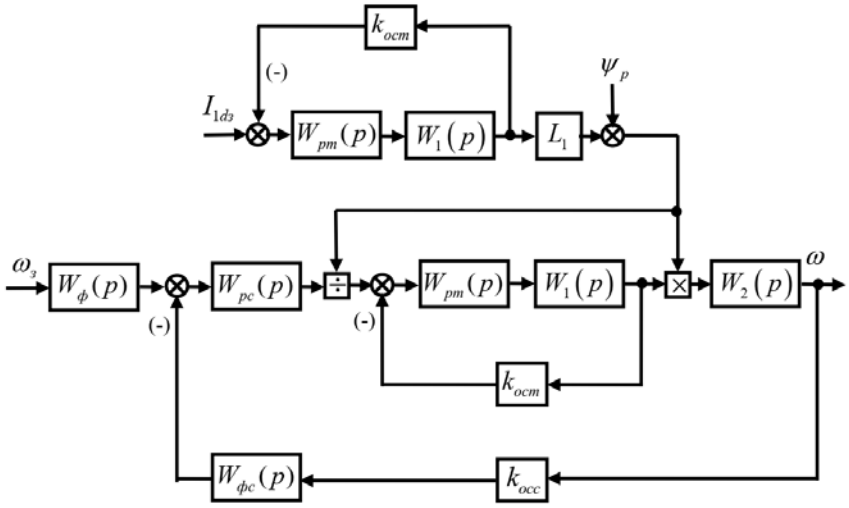


Рис. 2. Структурная схема аналогового прототипа системы векторного управления синхронным двигателем

Также регулируемый электропривод содержит двухконтурную систему стабилизации скорости ω с внутренним контуром регулирования проекции тока статора I_{1q} с аналогичным регулятором $W_{pm}(p)$ и внешним контуром скорости. Контуры тока замкнуты с помощью датчиков тока и преобразователя координат, имеющих совокупный коэффициент передачи $k_{ост}$. В самом общем случае на входе контура скорости и выходе датчика скорости используются апериодические фильтры с передаточными функциями

$$W_ф(p) = \frac{1}{T_ф p + 1}, \quad (1)$$

$$W_{фс}(p) = \frac{1}{T_{фс} p + 1}, \quad (2)$$

соответственно.

На структурной схеме также приведены передаточные функции $W_1(p)$, $W_2(p)$ объекта управления, под которым понимается совокупность

силового преобразователя (инвертора) и двигателя. Применительно к синхронному двигателю [3]

$$W_1(p)=\frac{k_{сп}}{R_1(T_{сп}p+1)(T_1p+1)}, \tag{3}$$

$$W_2(p)=\frac{3Z_n}{2J_{пр}p}, \tag{4}$$

где $T_1=\frac{L_1}{R_1}$ – постоянная времени обмотки статора; L_1 и R_1 – индуктивность и активное сопротивление обмотки статора; $k_{сп}$ и $T_{сп}$ – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя; Z_n – число пар полюсов двигателя; $J_{пр}$ – приведенный к валу двигателя момент инерции.

Очевидно, что на быстродействие следящего электропривода оказывает огромной влияние не только структурное построение, но и корректный выбор параметров регуляторов. При этом контуры токов системы векторного управления, как правило, настраивают на технический оптимум, который обеспечивают пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы с передаточной функцией

$$W_{рт}(p)=\frac{(T_1p+1)}{\frac{2k_{сп}k_{ост}T_{сп}}{R_1}p}=k_{рт}+\frac{1}{T_{рт}p}. \tag{5}$$

Из (5) следует, что настройки регуляторов тока должны рассчитываться по формулам

$$k_{рт}=\frac{L_1}{2k_{сп}k_{ост}T_{сп}p};\ T_{рт}=\frac{2k_{сп}k_{ост}T_{сп}}{R_1}. \tag{6}$$

С учетом выражений (5) и (6) передаточная функция каждого замкнутого контура тока будет иметь вид

$$W_{зт}(p)=\frac{k_{зт}}{a_0p^2+a_1p+1}, \tag{7}$$

где $k_{зт}=\frac{1}{k_{ост}};\ a_0=2T_{сп}^2;\ a_1=2T_{сп}$.

Однако, необходимо учитывать, что в некоторых электроприводах [4] применяются пропорциональные регуляторы тока $W_{рт}(p)=k_{рт}$. В этом случае передаточные функции замкнутых контуров тока будут определяться следующими параметрами

$$k_{зт}=\frac{k_{рт}k_{сп}}{R_1+k_{рт}k_{сп}k_{ост}};\ a_0=\frac{L_1T_{сп}}{R_1+k_{рт}k_{сп}k_{ост}};\ a_1=\frac{R_1(T_1+T_{сп})}{R_1+k_{рт}k_{сп}k_{ост}}. \tag{8}$$

При регулировании скорости синхронного двигателя вниз от номинальной стремятся поддерживать $I_{1d}=0$, при этом потокосцепление ψ_2 определяется только постоянными магнитами. В связи с этим для парамет-

рического синтеза остальных регуляторов рассматриваемого следящего электропривода можно воспользоваться следующим структурным представлением (рис. 3).

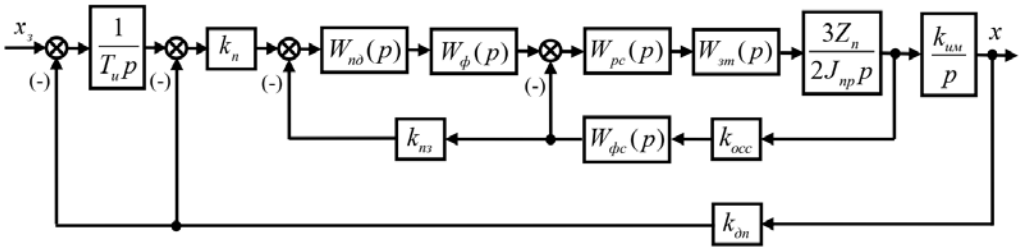


Рис. 3. Упрощенная структурная схема следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем

Внутренний контур скорости, входящий в состав регулируемого электропривода, как правило, настраивается на симметричный оптимум, который обеспечивает ПИ регулятор скорости

$$W_{рс}(p)=\frac{4\left(2T_{сп}+T_{фс}\right)p+1}{\frac{12Z_n k_{осс}\left(2T_{сп}+T_{фс}\right)^2}{k_{ост}J_{пр}}p}=k_{рс}+\frac{1}{T_{рс}p}, \qquad (9)$$

где $k_{рс}=\frac{k_{ост}J_{пр}}{3Z_n k_{осс}\left(2T_{сп}+T_{фс}\right)}$; $T_{рс}=\frac{12Z_n k_{осс}\left(2T_{сп}+T_{фс}\right)^2}{k_{ост}J_{пр}}$.

С учетом формул (7) и (9) передаточная функция замкнутого внутреннего контура скорости будет иметь вид

$$W_{зс}(p)=\frac{b_{01}p^2+b_{11}p+1}{k_{осс}\left(a_{01}p^5+a_{11}p^4+a_{21}p^3+a_{31}p^2+a_{41}p+1\right)}, \qquad (10)$$

где

$$b_{01}=k_{рс}T_{рс}T_{фс};\ b_{11}=k_{рс}T_{рс}+T_{фс};\ a_{01}=\frac{2a_0J_{пр}T_{рс}T_{фс}}{3Z_n k_{зт}k_{осс}};\ a_{11}=\frac{2J_{пр}T_{рс}\left(a_0+a_1T_{фс}\right)}{3Z_n k_{зт}k_{осс}};$$

$$a_{21}=\frac{2J_{пр}T_{рс}\left(a_1+T_{фс}\right)}{3Z_n k_{зт}k_{осс}};\ a_{31}=\frac{2J_{пр}T_{рс}}{3Z_n k_{зт}k_{осс}};\ a_{41}=k_{рс}T_{рс}.$$

Если в регулируемом электроприводе используется апериодический фильтр на входе контура скорости, то передаточная функция электропривода стабилизации скорости будет равна

$$W_{зсф}(p)=\frac{b_{01}p^2+b_{11}p+1}{k_{осс}\left(a_{02}p^6+a_{12}p^5+a_{22}p^4+a_{32}p^3+a_{42}p^2+a_{52}p+1\right)}, \qquad (11)$$

где $a_{02}=a_{01}T_ф$; $a_{12}=a_{01}+a_{11}T_ф$; $a_{22}=a_{11}+a_{21}T_ф$; $a_{32}=a_{21}+a_{31}T_ф$; $a_{42}=a_{31}+a_{41}T_ф$; $a_{52}=a_{41}+T_ф$.

Формулы (10) и (11) позволяют найти передаточные функции остальных контуров рассматриваемого следящего электропривода при неизвестных пока параметрах настроек И, П и ПД регуляторов. В частности, передаточная функция второго замкнутого контура имеет вид

$$W_{зс2}(p)=\frac{k_{зс2}\left(T_{пд}p+1\right)\left(b_{01}p^2+b_{11}p+1\right)}{a_{03}p^7+a_{13}p^6+a_{23}p^5+a_{33}p^4+a_{43}p^3+a_{53}p^2+a_{63}p+1}, \qquad (12)$$

где

$$k_{зс2}=\frac{k_{пд}}{k_{осс}\left(1+k_{пд}k_{пз}\right)};\ a_{03}=\frac{a_{02}T_{фс}}{1+k_{пд}k_{пз}};\ a_{13}=\frac{a_{02}+a_{12}T_{фс}}{1+k_{пд}k_{пз}};\ a_{23}=\frac{a_{12}+a_{22}T_{фс}}{1+k_{пд}k_{пз}};$$

$$a_{33}=\frac{a_{22}+a_{32}T_{фс}}{1+k_{пд}k_{пз}};\ a_{43}=\frac{a_{32}+a_{42}T_{фс}+k_{пд}k_{пз}b_{01}T_{пд}}{1+k_{пд}k_{пз}};$$

$$a_{53}=\frac{a_{42}+a_{52}T_{фс}+k_{пд}k_{пз}\left(b_{01}+b_{11}T_{пд}\right)}{1+k_{пд}k_{пз}};\ a_{63}=\frac{a_{52}+T_{фс}+k_{пд}k_{пз}\left(b_{11}+T_{пд}\right)}{1+k_{пд}k_{пз}};$$

$k_{пд}$ и $T_{пд}$ – коэффициент передачи и постоянная времени ПД регулятора; $k_{пз}$ – коэффициент передачи пропорционального звена.

Внутренний контур положения определяется передаточной функцией

$$W_{зп1}(p)=\frac{\left(T_{пд}p+1\right)\left(b_{01}p^2+b_{11}p+1\right)}{k_{дп}\left(a_{04}p^8+a_{14}p^7+a_{24}p^6+a_{34}p^5+a_{44}p^4+a_{54}p^3+a_{64}p^2+a_{64}p+1\right)}, \qquad (13)$$

где $a_{04}=\frac{a_{03}}{K};\ a_{14}=\frac{a_{13}}{K};\ a_{24}=\frac{a_{23}}{K};\ a_{34}=\frac{a_{33}}{K};\ a_{44}=\frac{a_{43}}{K};\ a_{54}=\frac{a_{53}}{K}+b_{01}T_{пд};$

$a_{64}=\frac{a_{63}}{K}+b_{01}+b_{11}T_{пд};\ a_{74}=\frac{1}{K}+b_{11}+T_{пд};\ K=k_nk_{зс2}k_{им}k_{дп}$ k_n – коэффициент передачи П регулятора; $k_{им}$ и $k_{дп}$ – коэффициент передачи исполнительного механизма и датчика положения, соответственно.

Динамика всего следящего электропривода будет характеризоваться передаточной функцией

$$W_{зп2}(p)=\frac{\left(T_{пд}p+1\right)\left(b_{01}p^2+b_{11}p+1\right)}{k_{дп}\left(a_{05}p^9+a_{15}p^8+a_{25}p^7+a_{35}p^6+a_{45}p^5+a_{55}p^4+\right.}, \qquad (14)$$

$$\left.+a_{65}p^3+a_{75}p^2+a_{85}p+1\right)$$

где $a_{05}=a_{04}T_u;\ a_{15}=a_{14}T_u;\ a_{25}=a_{24}T_u;\ a_{35}=a_{34}T_u;\ a_{45}=a_{44}T_u;\ a_{55}=a_{54}T_u;$

$a_{65}=a_{64}T_u+b_{01}T_{пд};\ a_{75}=a_{74}T_u+b_{11}T_{пд}+b_{01};\ a_{85}=T_u+T_{пд}+b_{11};\ T_u$ – постоянная времени интегрального регулятора.

Полученные выражения (12), (13) и (14) позволяют производить обоснованный выбор параметров регуляторов предлагаемого следящего электропривода. Например, из формулы (14) можно получить правило для расчета требуемой величины постоянной времени $T_{пд}$ ПД регулятора при выбранных заранее параметрах других регуляторов и фильтров. Для этого

разделим знаменатель (14) на $\left(T_{пд}p+1\right)$ и получим выражение, связывающее величину $T_{пд}$, обеспечивающую компенсацию соответствующего полюса этой передаточной функции с относительной погрешностью Δ_3, с остальными параметрами электропривода

$$a_{85}-\frac{a_{75}}{T_{пд}}+\frac{a_{65}}{T_{пд}^2}-\frac{a_{55}}{T_{пд}^3}+\frac{a_{45}}{T_{пд}^4}-\frac{a_{35}}{T_{пд}^5}+\frac{a_{25}}{T_{пд}^6}-\frac{a_{15}}{T_{пд}^7}+\frac{a_{05}}{T_{пд}^8}=\left(1-\Delta_3\right)T_{пд}. \qquad (15)$$

Из (15) вытекает следующее алгебраическое уравнение, позволяющее рассчитать требуемое значение величины $T_{пд}$

$$d_0T_{пд}^9+d_1T_{пд}^8+d_2T_{пд}^7+d_3T_{пд}^6+d_4T_{пд}^5+d_5T_{пд}^4+d_6T_{пд}^3+d_7T_{пд}^2+d_8T_{пд}+d_9=0, \qquad (16)$$

$$d_0=\Delta_3;\ d_1=0;\ d_2=-\frac{T_u}{K}\left(1-\frac{k_{пд}k_{пз}}{1+k_{пд}k_{пз}}\right);\ d_3=\frac{T_u\left(a_{52}+T_{фс}\right)}{K\left(1+k_{пд}k_{пз}\right)};\ d_4=-\frac{T_u\left(a_{42}+a_{52}T_{фс}\right)}{K\left(1+k_{пд}k_{пз}\right)};$$

$$d_5=\frac{T_u\left(a_{32}+a_{42}T_{фс}\right)}{K\left(1+k_{пд}k_{пз}\right)};\ d_6=-a_{35};\ d_7=a_{25};\ d_8=-a_{15};\ d_9=a_{05}.$$

Пример расчета и результаты моделирования. Расчет регуляторов проведем для следящего электропривода поворотного стола СК36-1202, оснащенного синхронным двигателем 1FK7060-5AF71, управляемым устройством Simovert Masterdrives Motion Control. На этом устройстве можно реализовать предлагаемый следящий электропривод, представленный на рис. 1, с помощью свободных функциональных блоков и BICO-технологии программирования. Отличительная особенность Simovert Masterdrives Motion Control заключается в том, что в нем применены пропорциональные регуляторы токов, причем моделирование показывает, что применительно к двигателю 1FK7060-5AF71 оптимальной является величина коэффициента передачи регулятора $k_{рт}=8$. Электродвигатель 1FK7060-5AF71 совместно с исполнительным механизмом и датчиком положения характеризуется следующими параметрами: $Z_n=4$, $L_1=0{,}0147$ Гн, $R_1=1{,}44$ Ом, $J_{пр}=1{,}778\cdot10^{-3}$ кгм^2, $k_{им}=326$ дискрет/рад, $k_{дп}=1$. В системе векторного управления, реализованной в Simovert Masterdrives Motion Control, сигнал обратной связи по току рассчитывается в амперах, а обратной связи по скорости – в оборотах в минуту, поэтому $k_{ост}=1$, $k_{осс}=9{,}549$ об/мин·рад. Регулятор тока вычисляет сигнал задания силовому преобразователю в вольтах, в связи с этим $k_{сп}=1$. Кроме того, следует учитывать, что частота широтно-импульсной модуляции в Simovert Masterdrives Motion Control равна 5 кГц и регулятор именно с этой частотой формирует сигнал задания силовому преобразователю, поэтому $T_{сп}=0{,}0002$ с. Расчет по формулам (7) и (8) показывает, что $k_{зт}=0{,}847$; $a_0=3{,}114\cdot10^{-7}$ с^2; $a_1=1{,}588\cdot10^{-3}$ с. Для рассматриваемого электропривода параметры настройки ПИ регулятора скорости в соответствии с формулой (9) должны быть равны $k_{рс}=0{,}039$, $T_{рс}=0{,}041$ с.

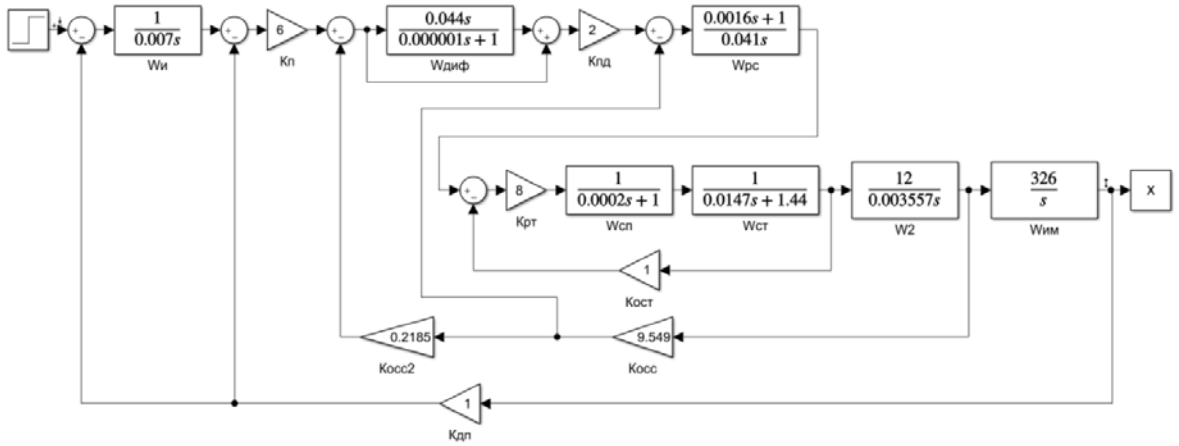


Рис. 4. Расчетная модель следящего электропривода

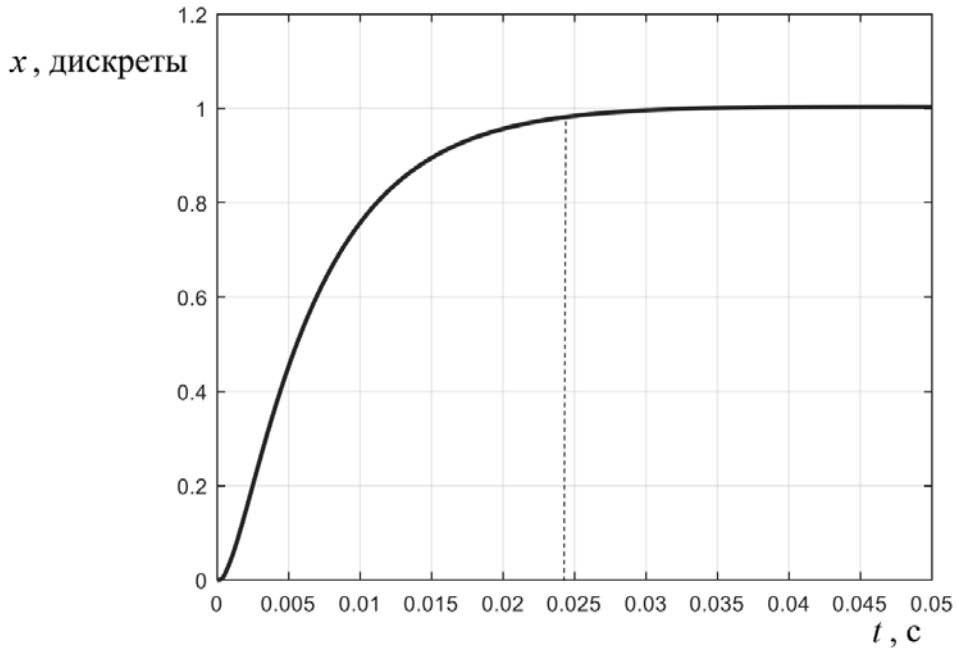


Рис. 5. График переходного процесса по управляющему воздействию

При выборе $k_{пд} = 2$, $k_п = 6$, $k_{пз} = 0,2185$, $T_и = 0,007$ с, $T_{фс} = 0$ с, $T_ф = 0$ с, и $\Delta_3 = 0,01$ последовательный расчет по формулам (10) – (16) дает следующий результат: $d_0 = 0,01$; $d_1 = 0$; $d_2 = -1,709 \cdot 10^{-5}$; $d_3 = 5,469 \cdot 10^{-5}$; $d_4 = -7,302 \cdot 10^{-9}$; $d_5 = 2,314 \cdot 10^{-11}$; $d_6 = -2,06 \cdot 10^{-14}$; $d_7 = 0$; $d_8 = 0$; $d_9 = 0$. Решение уравнения (16) в программе MathCAD позволяет найти корни: $T_{пд1} = -0,045$ с, $T_{пд2,3} = -1,15 \cdot 10^{-4} \mp j0,019$ с, $T_{пд4} = T_{пд5} = T_{пд6} = 0$ с, $T_{пд7} = 2,292 \cdot 10^{-4}$ с, $T_{пд8} = 1,36 \cdot 10^{-3}$ с, $T_{пд9} = 0,044$ с.

В соответствии с условием задачи нам необходим наибольший корень уравнения (16), следовательно, постоянная времени ПД регулятора должна быть равна $T_{пд} = T_{пд9} = 0,044$ с.

С учетом выбранных параметров разработана расчетная модель предлагаемого следящего (рис. 4).

Эта модель позволила построить график переходного процесса при отработке управляющего воздействия (рис. 5), который показывает, что время переходного процесса равно $t_{пп} = 0,024$ с, а перерегулирование составляет $\sigma = 0,4$ %.

Таким быстродействием при обработке управляющих воздействий не обладает ни один известный следящий электропривод. При этом следует отметить, что предлагаемый электропривод можно реализовать на серийно выпускаемых устройствах, например, Simovert Masterdrives Motion Control или Sinamics S120, используя их дополнительные функциональные возможности.

Выводы:

1. Предложенный принцип построения и методика синтеза регуляторов позволяет повысить быстродействие следящих электроприводов прецизионных станков с синхронными исполнительными двигателями.

2. Техническая реализация предложенного следящего электропривода требует минимумв дополнительных затрат.

Список литературы

1. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1990. 304 с.

2. Лисин С.Л. Повышение быстродействия следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 4 (36), 2012. С. 173 – 181.

3. Азизов А.А., Байбиков И.Ф., Козловский В.Н., Стариков А.В. Дискретная математическая модель системы векторного управления электродвигателем переменного тока // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2024. Вып. 12. С. 648 – 653.

4. Simovert Masterdrives Motion Control: Compendium. Germany: Siemens AG, 2006. 1498 p.

Байбиков Ильгиз Фяритович, аспирант, baibikovif@ioes.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Стариков Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, star58@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

INCREASING THE RESPONSE SPEED OF THE PRECISION MACHINES SERVO DRIVES WITH SYNCHRONOUS MOTORS

I.F. Baibikov, V.N. Kozlovsky, A.V. Starikov

The article is devoted to the development of a servo drive with a synchronous motor for precision machine tools, which has an increased response speed when processing control actions. The functional and structural diagrams of the proposed servo drive, as well as the

transfer functions of closed loops are given. A method for parametric synthesis of controllers has been developed, which ensures an increase in the response speed of the servo drive. The results of computer modeling are given, showing the achievable response speed of the proposed servo drive.

Key words: servo drive, synchronous motor, precision machine tool, parametric synthesis.

Baybikov Ilgiz Fyaritovich, postgraduate, baibikovif@ioes.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Starikov Alexander Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, star58@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 621.313
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-59-60

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСИЛИЙ В ТРЕХФАЗНОМ СТЕРЖНЕВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

Ю.Н. Иванников, Ю.А. Макаричев, Е.А. Полянский

В трансформаторостроении одной из важных проблем является обеспечение надежности и устойчивой работы трансформатора в результате воздействия ударных токов короткого замыкания (КЗ). Ток при внезапном КЗ может превышать установившийся ток короткого замыкания в 1,2-1,8 раза, а электромагнитные силы, действующие на витки обмоток, могут вызывать механические деформации и повреждения изоляции. В настоящее время параметры КЗ на стадии проектирования определяются на основе аналитической методики, базирующейся на требования ГОСТ 52719 – 2007, которая не предполагает расчет механических напряжений отдельных витков катушек высокого (ВН) и низкого (НН) напряжения. Как показывает опыт эксплуатации силовых трансформаторов, повреждению в результате КЗ получают не все витки обмоток в равной мере. Поэтому еще на стадии проектирования следует определить зоны обмоток, которые наиболее подвержены вероятности механических повреждений. В предлагаемой статье приведен алгоритм уточненного расчета параметров трансформатора в режиме внезапного КЗ, основанный на современных методах численного моделирования динамических электромагнитных и механических процессов.

Ключевые слова: масляный трансформатор, короткое замыкание, электродинамические процессы, математическое моделирование.

В силовых трансформаторах максимальный ударный ток при коротком замыкании достигает значений (15…25)$I_{1н}$ (большие значения относятся к трансформаторам большей мощности) [1]. Электромагнитные усилия, действующие на обмотки пропорциональны произведению токов короткого замыкания (КЗ) в обмотках высокого (ВН) и низкого (НН) напряжения, возрастают по сравнению с номинальным режимом в 225–625 раз [2,3].

Надежность работы трансформатора во многом зависит от механической стойкости обмоток в режиме КЗ. Недостаточная механическая

стойкость обмотки может привести к её деформации и последующему аварийному отказу. ГОСТ Р 55188–2012 (МЭК 60076-5:2006) регламентирует величину тока и продолжительность короткого замыкания, в течение которого обмотки должны выдерживать осевые и радиальные электромагнитные силы, а также тепловые нагрузки. Требования, предъявляемые к механической стойкости обмоток, предполагают тщательный анализ характеристик короткого замыкания на этапе проектирования. Традиционные методики [4, 5, 6], основанные на упрощенном подходе к расчету электродинамических усилий, предполагают, что обмотки являются монолитными в механическом отношении, а расчет сил производится по средним значениям индукции в расчетной зоне. Эти допущения могут привести к значительным погрешностям в определении ударных механических воздействий.

Развитие компьютерных технологий позволяет решить подобные задачи с использованием численных методов в двумерной или трехмерной постановке, за счет чего повышается точность определения характеристик магнитного поля в расчетной области, и могут быть найдены механические усилия, действующие на каждый отдельный виток (катушку) обмотки.

Теоретической основой численных методов решения электромагнитных процессов являются система дифференциальных уравнений в частных производных Максвелла. В общем случае электромагнитное поле описывается известной [7, 8, 9] системой уравнений:

$$\begin{cases} \left.\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{aligned}\right\} \text{электромагнитная связь} \\ \left.\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \end{aligned}\right\} \text{уравнения неразрывности поля} \\ \left.\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu\mathbf{H} + \mathbf{B}_r \\ \mathbf{D} &= \varepsilon\mathbf{E} \end{aligned}\right\} \text{уравнения описывающие свойства материалов} \\ \mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \text{ закон Ома} \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{E}$ – вектор напряженности электрического поля; $\mathbf{D}$ – вектор электрической индукции; $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции, $\mathbf{J}$ – плотность тока, ρ – объемная плотность заряда, $\mathbf{B}_r$ – вектор индукции остаточной намагниченности; μ – тензор магнитной проницаемости; ε – диэлектрическая проницаемость; σ – удельная электрическая проводимость.

Система уравнений Максвелла (1) полностью описывают электромагнитные процессы, однако в большинстве случаев их нельзя решить непосредственно [8, 10]. При решении конкретных типов электромагнитных задач выгодно с точки зрения сокращения вычислительных ресурсов перейти потенциальной постановке относительно векторного магнитного потенциала $\mathbf{A}$ и скалярного электрического потенциала φ.

В качестве объекта моделирования был выбран хорошо изученный трехфазный двухобмоточный стержневой масляный трансформатор типа ТМ 1600/35. Это позволило проверить применимость исследуемой методики результатами длительной эксплуатации данного типа трансформаторов в электрических сетях. Рассматриваемый трансформатор имеет медные обмотки. Обмотка низкого напряжения – винтовая, двухходовая с радиальными каналами в витках и между витками с равномерно распределенной транспозицией. Один виток состоит из 12 параллельных проводников, разделенных на две группы по 6 проводов. Число витков $w_1 = 24$. Номинальное фазное напряжение $U_{1ф} = 399$ В. Обмотка высокого напряжения – непрерывная катушечная, номинальное число витков $w_2 = 1215$, регулирование напряжения осуществляется на высокой стороне, отключаемые катушки располагаются в середине обмотки. Магнитопровод трансформатора изготовлен из холоднокатаной высоколегированной электротехнической стали марки 3404.

Рассматриваемая задача может быть решена в стационарной постановке, если точно известны граничные и начальные условия, одним из которых является амплитудное значение ударного тока. Однако точность определения значения ударного тока короткого замыкания, определенного аналитическими методами, недостаточна, и с учетом существенного влияния тока на величину механических сил (в традиционной методике зависимость квадратичная), задача была определена и решена в нестационарной постановке. Источником поля было задано напряжение на клеммах трансформатора.

Специфика геометрической модели трехфазного трансформатора не позволяет моделирование магнитных процессов в двумерной постановке без значительных допущений. Поэтому рассматриваемая задача решалась для трехмерной математической модели в нестационарной постановке. Подобные задачи, как отмечалось выше, описываются системой уравнений в потенциальной постановке относительно векторного магнитного потенциала **A** и скалярного электрического потенциала φ.

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -\nabla\varphi - \dfrac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \end{cases}$$

В потенциальной постановке математическая модель электромагнитного поля имеет вид:

$$\begin{cases} \nabla^2\varphi + \dfrac{\partial}{\partial t}\left(\nabla \cdot A\right) = -\dfrac{\rho}{\varepsilon_0} \\ \left(\nabla^2 \mathbf{A} - \varepsilon_0\mu_0 \dfrac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2}\right) - \nabla\left(\nabla \cdot \mathbf{A} + \varepsilon_0\mu_0 \dfrac{\partial \varphi}{\partial t}\right) = -\mu_0 \mathbf{J} \end{cases} \quad (2)$$

Для описания электромагнитных процессов преобразования энергии в трехфазном трансформаторе система дифференциальных уравнений (2) может быть упрощена при введении допущения об отсутствии электрических зарядов в расчетной области. Отмеченное допущение не приводит к

значительным погрешностям, так как справедливо практически для всех индукционных преобразователей [7]. В этом случае математическая модель описывается упрощенной системой уравнений нестационарного магнитного поля относительно векторного магнитного потенциала:

$$\begin{cases} \sigma\dfrac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathrm{rot}\left(\dfrac{1}{\mu}\mathrm{rot}\mathbf{A}\right) = \mathbf{J} \\ \mathrm{div}\mathbf{A} = 0 \end{cases} \qquad (3)$$

Целью решения задачи нестационарного магнитного поля трехфазного трансформатора являлось уточнение величины ударного тока и вызванных им механических нагрузок, изменяющихся во времени.

Для моделирования задач стационарного и нестационарного магнитного поля использовалась специализированное программное обеспечение Ansys Maxwell версия 16.0.2. Математической основой в Ansys Maxwell является метод конечных элементов. Программа позволяет учитывать нелинейные свойства электротехнических материалов, а также вихревые токи в массивных элементах, например, баке, в задачах нестационарного магнитного поля. Ansys Maxwell имеет адаптивный сеточный генератор с автоматическим контролем ошибки вычислений.

Геометрическая модель исследуемого трансформатора - трехмерная, с разбиением активных частей на расчетные блоки, отличающихся физическими свойствами, рис. 1. На рисунке: (1) – магнитопровод трансформатора, (2) – обмотки высшего напряжения, (3) – обмотки низкого напряжения, (4) – плоскости граничных условий симметрии. Для наглядности бак трансформатора не показан, но в модели он учитывался.

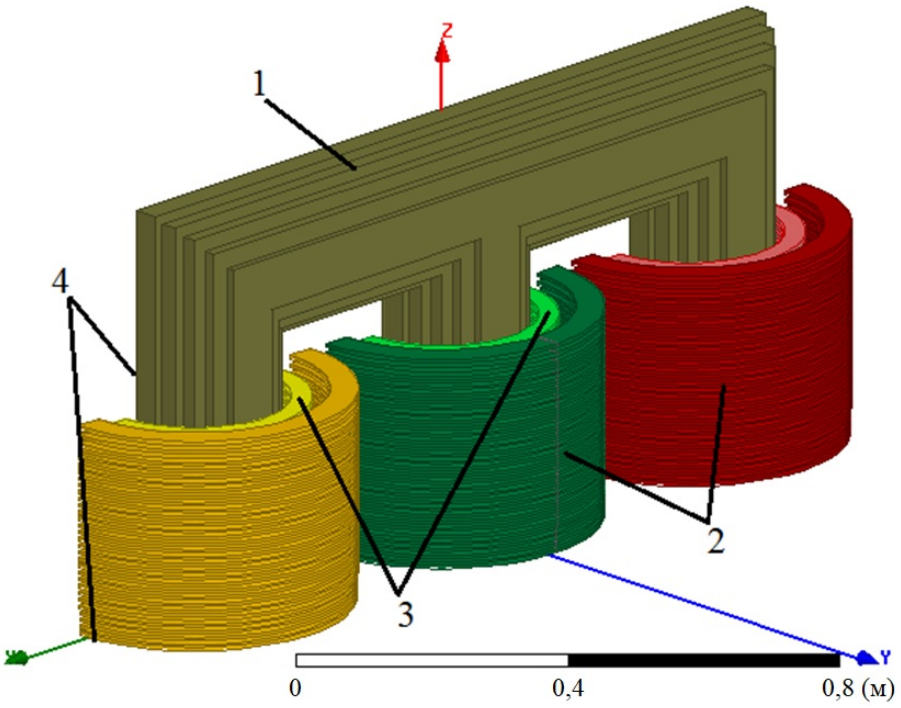


Рис. 1. Геометрическая модель трансформатора

В расчетных блоках модели, соответствующих обмоткам трансформатора, задавалось количество витков, схема соединения катушек, активное сопротивление обмотки, а также амплитудное значение и частота питающего напряжения для первичной обмотки. Вторичная обмотка моделировалась замкнутой на активное сопротивление, с возможностью изменения величины сопротивления в процессе моделирования, что позволяло моделировать различные режимы работы трансформатора. Для сокращения времени моделирования и требуемых вычислительных возможностей ЭВМ геометрическая модель представляет собой симметричную четверть реального трансформатора (рис. 1). На поверхностях разреза заданы граничные условия симметрии с нормальной составляющей магнитного потока (*Even*) на поверхности *XY* и с тангенциальной составляющей (*Odd*) на поверхности *XZ* рис. 1. На границе расчетной области задано граничное условие, соответствующее нулевому значению тангенциальной составляющей магнитного поля. Основное допущение, принятое при моделировании электромагнитных процессов – работа трансформатора от сети бесконечной мощности.

Для уточнения напряжения и полного сопротивления короткого замыкания было проведено моделирование опыта короткого замыкания трансформатора. Для этого сопротивление нагрузки принято равным нулю, что соответствует закороченной накоротко обмотке. Регулятор напряжения установлен в положение, соответствующее номинальному напряжению. К клеммам первичной обмотки приложено номинальное значение напряжения короткого замыкания u_k = 6,92 %, рассчитанное аналитическими методами [4]. Результат моделирования в виде кривых фазных токов обмоток ВН и НН представлен на рис. 2.

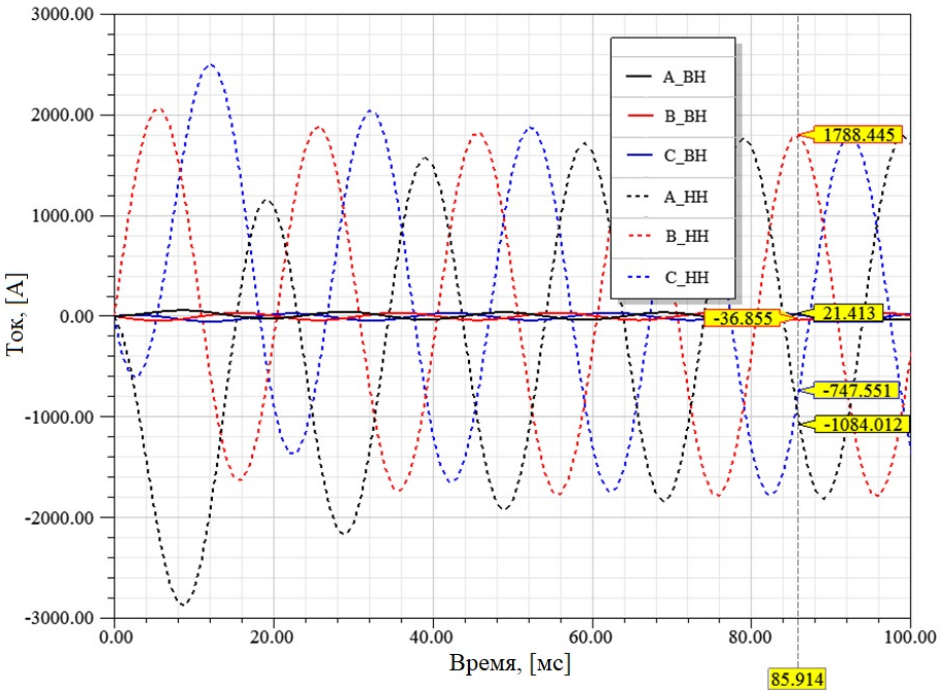


Рис. 2. Токи в обмотках трансформатора. (Моделирование опыта КЗ)

Из графиков видно, что при приложении номинального напряжения короткого замыкания, рассчитанного по традиционной методике [4] в первичной обмотке устанавливается ток, отличающийся от номинального на величину около 1 %. Ток во вторичной обмотке меньше номинального на 5,6 %, что дает основание утверждать, что численная модель достаточно точно описывает электромагнитные процессы трансформатора.

Далее было проведено моделирование аварийного режима работы трансформатора – внезапного трехфазного короткого замыкания. Для этого в момент времени, когда напряжение фазы *A* проходит через ноль сопротивление нагрузки вторичной обмотки было установлено равным нулю. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4.

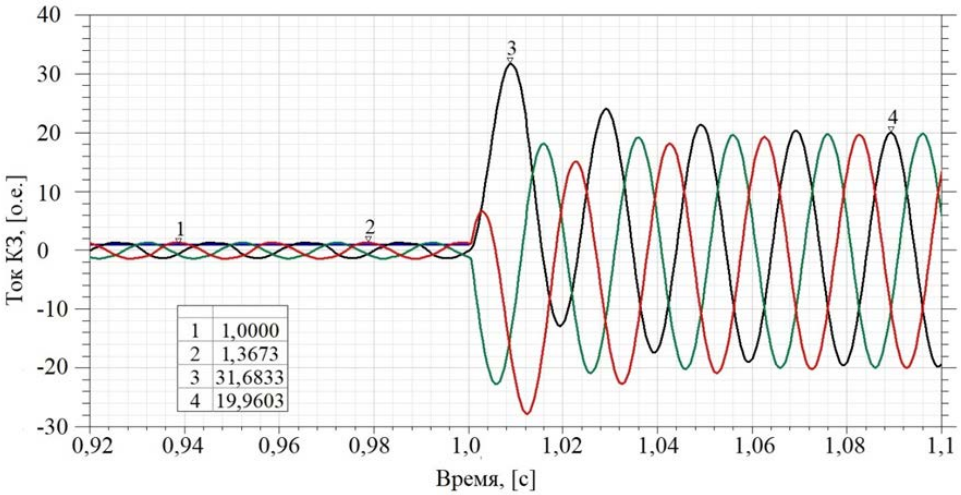


Рис. 3. Переходный процесс по току в режиме аварийного короткого замыкания (моделирование): 1 – действующее значение номинального тока; 2 – амплитудное значение номинального тока; 3 – ударный ток короткого замыкания; 4 – установившееся значение тока короткого замыкания, о.е.

Из рис. 3 видно наличие апериодической составляющей тока короткого замыкания. Переходный процесс устанавливается примерно за три периода (60 мс). Величина установившегося действующего значения тока короткого замыкания оказалась выше на 2,5 %, а величина максимального броска тока на 3,2 % по сравнению с определенными по аналитической методике.

На рис. 4 представлена кривая переходного процесса по среднему сжимающему механическому напряжению в радиальном направлении для обмотки низкого напряжения в режиме короткого замыкания.

Из рис. 4 видно, что ударное сжимающее напряжение значительно больше установившегося значения и может представлять существенную опасность для обмотки. Среднее сжимающее напряжение оказалась на 45,5 % выше рассчитанного по аналитической методике и составило 39,8% от допустимого напряжения, определенного в [3].

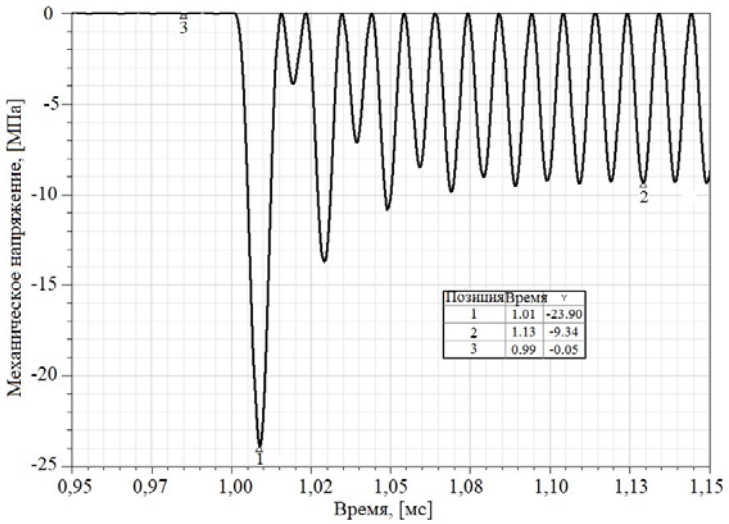


Рис. 4. Сжимающее напряжение обмотки низкого напряжения: 1 – амплитуда ударного механического напряжения; 2 – амплитуда установившегося значения механических напряжений в режиме короткого замыкания; 3 – амплитуда механических напряжений в номинальном режиме работы

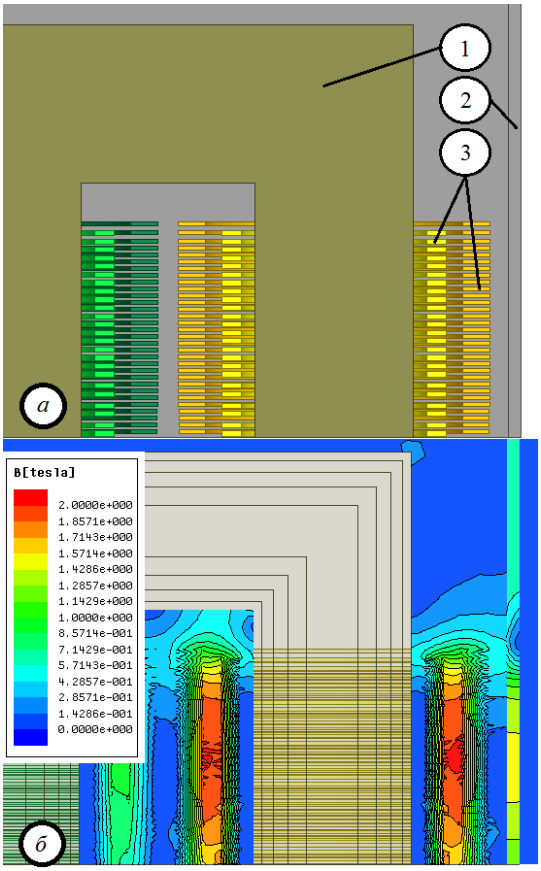


Рис. 5. Геометрическая модель трансформатора (а). Картина магнитного поля в режиме короткого замыкания (б): 1 – Магнитопровод; 2 – бак; 3 – обмотки трансформатора

Для уточнения распределения механических напряжений по катушкам обмоток было проведено моделирование магнитного поля трансформатора в режиме короткого замыкания в стационарной постановке. В качестве источников поля задавалась МДС обмоток с мгновенным значением тока, соответствующему максимальному его значению из графика рис. 3. Результаты моделирования представлены на рис. 5 и 6.

Магнитное поле рассеяния трансформатора в режиме короткого замыкания имеет сложную структуру. Картина магнитного поля симметрична относительно оси абсцисс (в задаче используется граничное условие симметрии). Основная плотность магнитного потока сосредоточена в пространстве между катушками, величина магнитной индукции здесь достигает максимальной величины. В средней части обмотки по высоте величина магнитной индукции снижена за счет расположении здесь регулировочных катушек с меньшим количеством витков и увеличенных радиальных каналов в обмотке низкого напряжения. Часть магнитного потока замыкается по стенкам бака, вызывая дополнительные потери.

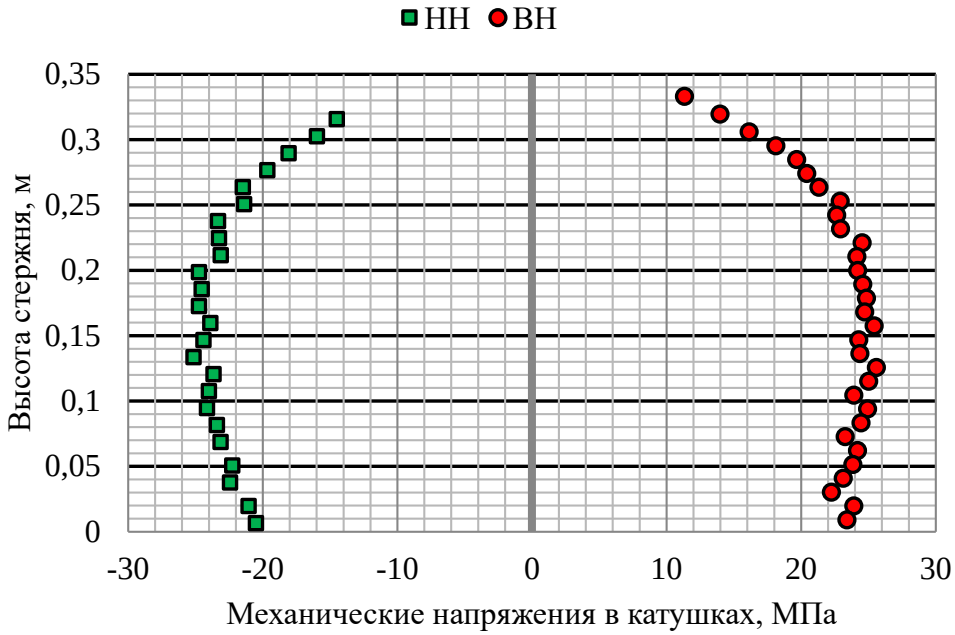


Рис. 6. Механические напряжения, действующие на катушки обмоток

На рис. 6 представлены результаты моделирования в виде диаграммы распределения механических усилий по отдельным катушкам обмотки ВН и виткам обмотки НН. Видно, что на обмотку НН оказывается сжимающее механическое усилие, а на обмотку ВН – равное по величине растягивающее. Так как по всем виткам обмотки протекает один ток, то величина механических усилий зависит от распределения магнитной индукции в осевом канале между обмотками. Следовательно, минимальные радиальные усилия испытывают на себе витки и катушки, на краях обмотки. Расположение витков, испытывающих максимальное напряжения, зависит также от расположения регулировочных катушек. В рассматриваемом слу-

чае регулировочные катушки находятся в центре обмотки (ось абсцисс на рис. 5), а максимальное напряжение приходится на витки, расположенные между серединой и краем обмотки.

Выводы:

1. Аналитические расчеты электродинамических усилий в обмотках трансформаторов не возможны без существенных допущений и дают только приближенную интегральную оценку механических напряжений в обмотке, не учитывающую различное положение отдельных витков и реальную конфигурацию магнитного поля в режиме короткого замыкания.

2. Более точную картину максимальных электромагнитных усилий и механических напряжений для каждого витка (катушки) дает математическая модель, основанная на трехмерном численном расчете магнитного поля трансформатора в режиме короткого замыкания.

3. Среднее значение сжимающего радиального усилия на обмотку, полученное по результатам численного моделирования, на 45,5% выше, чем полученное по упрощенным аналитическим методикам. Установлено, что усилие, действующее на витки, расположенные в центре катушек, на 33,2% больше, чем среднее по обмотке.

Список литературы

1. Вольдек А.И., Попов В. В. В71 Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2007. 350 с.

2. Брошюра СИГРЭ 209. «Стойкость силовых трансформаторов к коротким замыканиям», Август 2002 (CIGRE Brochure 209. «The Short-circuit Performance of Power Transformers», August 2002).

3. ГОСТ Р 55188–2012 (МЭК 60076-5:2006). Трансформаторы силовые. Стойкость к коротким замыканиям. М.: Стандартинформ, 2014.

4. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Учеб. Пособия для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. / П.М. Тихомиров, М.: Энергия, 1976. 544 с.

5. Лурье А.И. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / А.И. Лурье, М., 2005. 520 с.

6. Александров Н.М. Диагностические модели деформации обмоток силовых трансформаторов. уравнения электродинамических сил // Релейная защита и автоматизация. 2020. № 1. С. 12–15.

7. Тамм И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм, М.: Наука, 1989. 504 с.

8. Данилевич Я.Б. Численные методы анализа электрических машин / Я.Б. Данилевич, 1988. 220 с.

9. Саттаров Р.Р. Основы математического моделирования электрических машин: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2014. 142 с.

10. Кулон Ж.-Л., Сабоннадьер Ж.-К. Метод конечных элементов и САПР // Мир. 1989. С. 12.

Иванников Юрий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Yura_ivannik@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Макаричев Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, makarichev2801@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Полянский Евгений Анатольевич, аспирант, evgeniy.polyanskiy@samara-metallurg.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC FORCES IN A THREE-PHASE CORE TRANSFORMER

Yu.N. Ivannikov, Yu.A. Makarichev, E.A. Polyansky

In transformer manufacturing, one of the important problems is ensuring the reliability and stability of transformer operation as a result of exposure to short circuit (short circuit) shock currents. The current during a sudden short circuit can restore the established short circuit current by 1.2-1.8 times and the electromagnetic forces acting on the turns of the windings can lead to mechanical deformations of the housing and damage to the device. Currently, short-circuit parameters at the design stage are determined on the basis of the analytical methodology laid down in GOST 52719 – 2007, which does not involve calculating the mechanical stresses of individual turns of high-voltage (HV) and low-voltage (LV) coils. As experience in the operation of power transformers shows, not all winding turns are equally damaged as a result of a short circuit. Therefore, even at the design stage, it is necessary to determine the winding current zones that are most susceptible to the likelihood of mechanical damage. This article presents a method for refined calculation of transformer parameters in sudden short circuit mode, based on modern methods of numerical modeling of dynamic electromagnetic and mechanical processes.

Key words: oil transformer, short circuit, electrodynamic processes, mathematical modeling.

Ivannikov Yuri Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, Yura_ivannik@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Makarichev Yuri Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, makarichev2801@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Polyansky Evgeny Anatolyevich, postgraduate, evgeniy.polyanskiy@samara-metallurg.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 537.523.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-69-70

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА РАБОТЫ ГРОЗОЗАЩИТНЫХ РАЗРЯДНИКОВ

А.С. Чистяков, В.Я. Фролов, Г.В. Подпоркин

Представлена методика повышения ресурса работы разрядников, предназначенных для грозозащиты ЛЭП. При токе молнии, вызывающей существенную эрозию электродов разрядника, перевод разряда на вспомогательный защитный электрод позволит существенно повысить ресурс работы разрядника, ОПН защитить от выхода из строя. Приведена методика расчета устройства, состоящего из разрядника (или ОПН) и защитного искрового промежутка, а также проанализированы математические модели, применяемые для имитирования возникновения и развития электрической дуги. По критерию вероятности пробоя была определена область возникновения и распространения стримерных линий, а также разработана модель импульсной дуги на основе МГД уравнений.

Ключевые слова: математическая модель, искровой промежуток, стример, электрическая дуга, грозозащита.

Введение. Воздушные линии (ВЛ) электропередачи сейчас являются основой электрических сетей. Их надежная и бесперебойная работа необходима для качественной передачи электроэнергии потребителям.

По причине того, что у ВЛ опоры весьма высоки, а провода тянутся на многие километры, сами линии подвержены частым ударам молнии. Воздействие молнии является одной из самых частых причин отключений воздушных линий. Основную опасность представляют перенапряжения на линии, возникающие при ударе молнии: они способны перекрывать изоляторы и даже разрушать их. Кроме того, может происходить расщепление опор ЛЭП, а провода подвергаться усиленному износу. Более того, расходящаяся по проводу волна перенапряжения может вызывать нарушения в работе электроустановок подстанций и даже повреждать их [1]. Таким образом, очевидно, что от грозовых перенапряжений воздушные линии необходимо защищать.

Традиционные способы защиты ВЛ, такие как грозозащитный трос и нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) имеют определенные недостатки. Высокое удельное сопротивление грунта при использовании троса может привести к перекрытию с опоры на провод. Применение же ОПН для высоких классов напряжения является весьма дорогим техническим решением. Обеспечить должную молниезащиту могут такие перспективные устройства как разрядники с мультикамерной системой (РМК) [2-3].

Типовая конструкция РМК состоит из множества последовательно соединенных разрядных промежутков (количество которых зависит от класса напряжения ЛЭП) [4,5]. Промежутки ограничены шарообразными электродами и дополнены разрядным каналом (соплом), как правило, об-

рамленным по своей конфигурации силиконовой резиной. Все вместе они образуют разрядную камеру. Принцип действия такого разрядника основан на выдувании возникающих каналов искровых разрядов через сопла в окружающую среду [6-8]. Это становится возможным благодаря высокому давлению, возникающему внутри камеры малого объема. Дутьё приводит к удлинению и охлаждению каналов разрядов, сопротивление разрядника возрастает, что способствует ограничению импульсного тока грозового перенапряжения и гашению сопровождающего тока от ЛЭП, обусловленного напряжением промышленной частоты. Таким образом происходит гашение электрической дуги [9,10].

Однако у данного типа разрядников есть один существенный недостаток: достаточно большие импульсные токи (несколько килоампер) способны вывести устройство из строя или ограничить его срок службы [11]. Соответственно, для повышения срока службы разрядников в работе представлено дополнительное защитное (предохранительное) устройство для разрядника, когда импульсный ток молнии превысит нормативное значение.

Повышение ресурса работы разрядника для грозозащиты ЛЭП. Для повышения ресурса работы разрядников, используемых для грозозащиты ЛЭП или оборудования подстанций, устанавливается *защитный электрод* (рисунок 1).

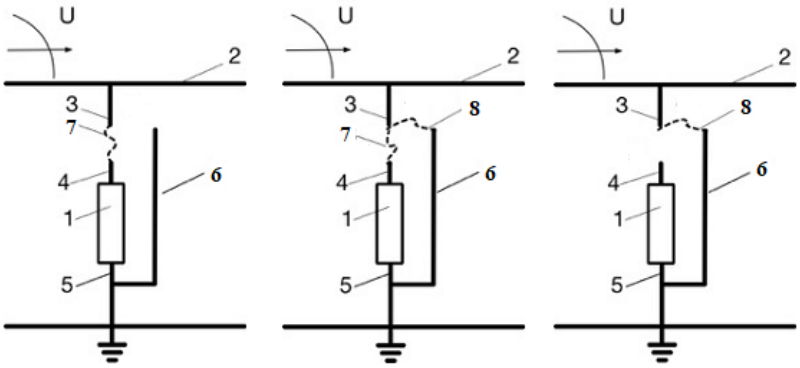


Рис. 1. Предлагаемый способ защиты разрядников: 1 – разрядник, 2 – провод линии, 3 – высоковольтный электрод искрового промежутка, 4 – высоковольтный электрод разрядника, 5 – низковольтный электрод разрядника, 6 – защитный электрод, 7 – канал искрового промежутка устройства с линией, 8 –искровой канал защитного искрового промежутка

Конструктивно устройство представляет из себя систему электродов: высоковольтные электроды 3 и 4, низковольтный электрод 5 и защитный электрод 6. Электроды 3 и 4 формируют искровой промежуток под высоким электрическим напряжением (на рисунке 1 он обозначен цифрой 7), причем электрод 4 соединён с защищаемым устройством. Электрод 5 также соединён с данным устройством и заземлён. С ним соединяется за-

щитный электрод 6, формирующий защитный искровой промежуток 8. В одном случае расположение его таково, что искровой разряд может переходить на защитный электрод с конца электрода 4, через который устройство подключается к высокому напряжению. В другом случае – разряд может перейти с конца электрода 3. Такая геометрия обеспечивает возможность искрового пробоя защитного искрового промежутка при недопустимых для устройства перенапряжениях и импульсных токах.

Методика расчета работы защитного устройства. Процесс проектирования новых устройств весьма непрост и зачастую связан с большими затратами. В связи с этим являются актуальными методы математического моделирования. В данном случае для моделирования электрического пробоя необходимо выбрать методику расчета стримеров и электрической дуги.

Математическая модель стримера. Возникновение электрического пробоя зависит от множества факторов, таких как геометрия, величина приложенного напряжения, тип газа, заполняющего пространство между электродами, давление и температура в системе. В целом моделирование плазмы является весьма непростой задачей, особенно учитывая геометрию рассматриваемой системы. Поэтому в данной задаче оценку, произойдет ли электрический пробой или нет, можно произвести и без полноценного моделирования всех процессов, происходящих с плазмой в системе, согласно методике, описанной в статье [12]. Согласно [12], процессы для предпробойного состояния можно описать через коэффициенты α и a, выражающие количество столкновений на единицу длины пробега электрона, приводящих к ионизации или прилипанию соответственно [13]. Для данных коэффициентов выполняется закон подобия (1):

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right), \quad (1)$$

где E – напряженность электрического поля, p – давление.

Если количество столкновений, приводящих к ионизации, больше количества столкновений, приводящих к прилипанию, то происходит развитие электронной лавины (2):

$$\alpha(E) > a(E). \quad (2)$$

Для определения вероятности электрического пробоя промежутка используется интегрирование коэффициента ионизации вдоль силовых линий электрического поля (3):

$$\int \alpha dl = K, \quad (3)$$

где α - коэффициент ионизации, l – длина единицы пути, K – критерий вероятности пробоя.

Величина K различается для разных сред. Согласно [14-16] в случае с воздухом пробой происходит при значениях больших или равных 18.

Математическая модель, основанная на описаном выше подходе была реализована в среде Comsol Multiphysics. Использование физического интерфейса «Electrostatics» позволяет построить картину линий напряженности электрического поля, а модуль «Electrical Breakdown Detection» при задании зависимости $\alpha(E)$ для воздуха [12] произвести интегрирование

коэффициента ионизации вдоль силовых линий электрического поля. В результате можно будет определить линии напряженности, выходящие из области электрода, где значение *K* больше или равно 18. Они и будут стримерными линиями, занимающими ограниченную область.

Данный шаг необходим для дальнейшего расчета электрической дуги, так как позволяет получить начальные условия для ее развития (проводящее нагретое плазменное облако).

Математическая модель импульсной дуги. Для моделирования дугового разряда применяется модель, основанная на приближении локального термодинамического равновесия [17]. Здесь используются уравнения Максвелла и система уравнений магнитной гидродинамики (МГД), в которую входят уравнения Навье-Стокса (5) – (7) для проводящего сжимаемого газа:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \boldsymbol{u}}{\partial t} + \nabla(\rho \boldsymbol{u} \otimes \boldsymbol{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + [\boldsymbol{j} \times \boldsymbol{B}] \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h\, \boldsymbol{u}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau u}) + \boldsymbol{j} \cdot \boldsymbol{E} + \nabla \cdot (\boldsymbol{q} + \boldsymbol{q_{rad}}), \quad (7)$$

где ρ – плотность плазмы, u – скорость газа, p – давление, t – время, τ – тензор вязких напряжений, h – удельная энтальпия, q – поток тепла, определяемый теплопроводностью, q_{rad} – тепловой поток, определяемый переносом излучения.

Влияние турбулентности учтено с помощью добавления эффективных вязкости и теплопроводности газа. В качестве модели турбулентности выбрана *k*- модель [18]. Также необходимо добавление двух уравнений состояния (8) - (9), необходимых для замыкания рассматриваемой системы уравнений (5) – (7):

$$\rho = \rho(p,T) \quad (8)$$

$$h=h(p,T)\,. \quad (9)$$

В данной задаче решается не полная система уравнений Максвелла, а используются уравнения магнитостатики (10) – (11).

$$\nabla \cdot \boldsymbol{j} = 0 \quad (10)$$

$$[\nabla \times \boldsymbol{B}] = \mu_0 \boldsymbol{j}. \quad (11)$$

Уравнения Навье-Стокса и Максвелла связны через выражение для силы Лоренца $\boldsymbol{j} \times \boldsymbol{B}$ и омического нагрева $\boldsymbol{j} \cdot \boldsymbol{E}$ (12):

$$\boldsymbol{j} = \sigma_{эл}\,(\boldsymbol{E} + [\boldsymbol{u} \times \boldsymbol{B}]), \quad (12)$$

где $\boldsymbol{j}$ – плотность тока, $\sigma_{эл}$ - электрическая проводимость плазмы, $\boldsymbol{E}$ – напряженность электрического поля, $\boldsymbol{B}$ – индукция магнитного поля.

Необходимые для расчета термодинамические и транспортные свойства плазмы (например, проводимость и теплоёмкость) являются функциями температуры и давления и поэтому могут быть предварительно рассчитаны в необходимом для решения задачи диапазоне температур и давлений и сохранены в виде массивов данных [19-21]. Влияние на химический состав продуктов эрозии электродов не учитывалось для упрощения расчета.

Также было необходимо учесть процесс переноса излучения как основного фактора передачи тепловой энергии. Данный процесс описывается с помощью уравнения переноса излучения (13):

$$s \cdot \nabla I_v(r,s) = ku[I_v^b(T) - I_v(r,s)], \quad (13)$$

где I_v (r,s) - интенсивность излучения из точки r в направлении s с частотой v, k – коэффициент поглощения среды, $I_v^b(T)$ – функция Планка (14)

$$I_v^b(T) = \frac{2h}{c^2} \frac{v^3}{e^{\frac{hv}{k_b T}} - 1}, \quad (14)$$

где c – скорость света, h – постоянная Планка, k_b – постоянная Больцмана.

Важно отметить, что коэффициент поглощения характеризуется сильной частотной зависимостью, поэтому частотный диапазон разбит на интервалы, для которых вычисляется среднее значение этого коэффициента. Так как наиболее существенным является затухание на высоких частотах, то было принято решение использовать простую модель с двумя интервалами [21].

Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований. В рамках начального этапа исследований была создана математическая модель рассматриваемого устройства (промежутки a и b равны и составляют 50 мм) в среде Comsol Multiphysics, представленная на рисунке 2. Для упрощения задачи рассматривалась двумерная модель. Напряжение, подаваемое на высоковольтный электрод, составляет 90 кВ.

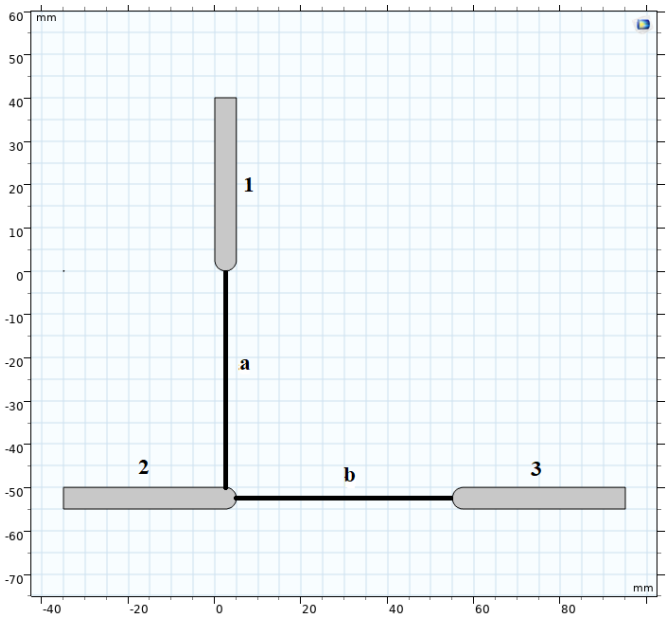
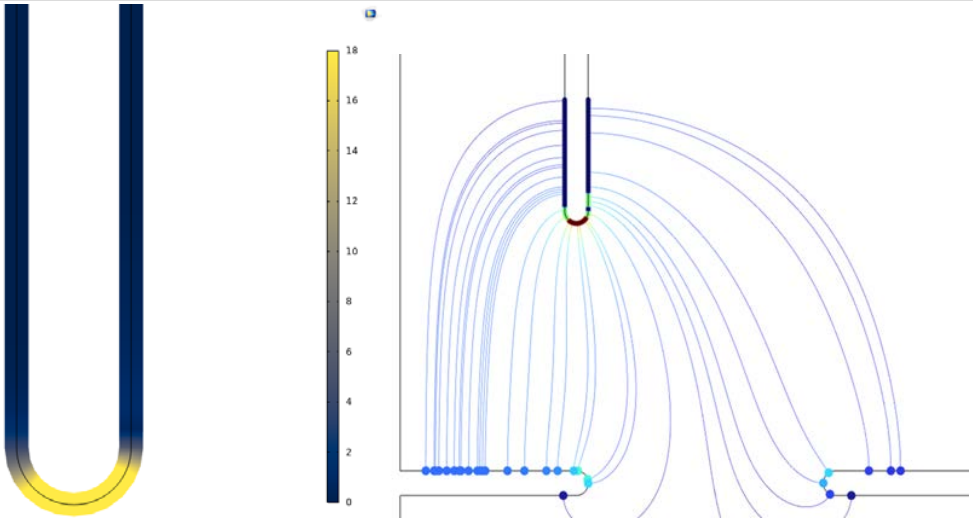


Рис. 2. Геометрия расчетной модели: 1 – высоковольтный электрод искрового промежутка, 2 – защищаемое устройство, 3 – защитный электрод

Результаты расчета величины K на высоковольтном электроде полученная картина распределения силовых линий электрического поля представлены на рисунке 3 (а и б соответственно).



а *б*

Рис. 3. Значение критерия K вероятности пробоя на высоковольтном электроде (а) и картина распределения силовых линий электрического поля (б)

Из полученных результатов видна область на электроде, откуда будет осуществляться распространение стримеров (закрашенная желтым цветом на рисунке 4а и красным на рисунке 4б область), а также примерная зона, которая будет занята развившимися стримерами, ограниченная силовыми линиями, выходящими из красной зоны на высоковольтном электроде. Это будет прогретая (до 2000 К) область, которую необходимо определить перед моделированием развития электрической дуги.

Моделирование развития электрической дуги было осуществлено с допущением, где промежуток b был небольшим и составлял 2 мм, что связано с ограниченностью компьютерных ресурсов и длительностью времени расчета. В данную модель был добавлен электрический контур, генерирующий импульсный ток [21]. В качестве защищаемого устройства было выбрано сопротивление 24 Ом. На рисунке 4 представлены результаты моделирования развития электрической дуги при использовании различных максимальных значений импульсных токов: 2.5 кА (апериодическое колебание) (а) и 6.2 кА (короткий импульс 0,35/1 мкс) (б).

Из полученных результатов видно, что при увеличении максимального значения подаваемого импульсного тока действительно происходит переброс электрической дуги на защищаемый электрод.

После этого было проведено экспериментальное исследование с целью определить возможность переброса электрической дуги, для чего была создана экспериментальная установка, соответствующая рисунку 2.

Принципиально она представляет из себя систему электродов, изображенную и описанную на рисунке 1: на электрод 1 подается высокое напряжение, низковольтный электрод 2 позволяет защищаемому заземлённому устройству (в данном случае сопротивлению величиной 24 Ом) подключаться к высокому напряжению, цифрой 3 обозначается защитный электрод. Межэлектродные расстояния были приняты одинаковыми

и равными 50 мм. На установку подавалось два тока величиной 2.5 и 6.2 кА (рисунок 5а и 5б, соответственно).

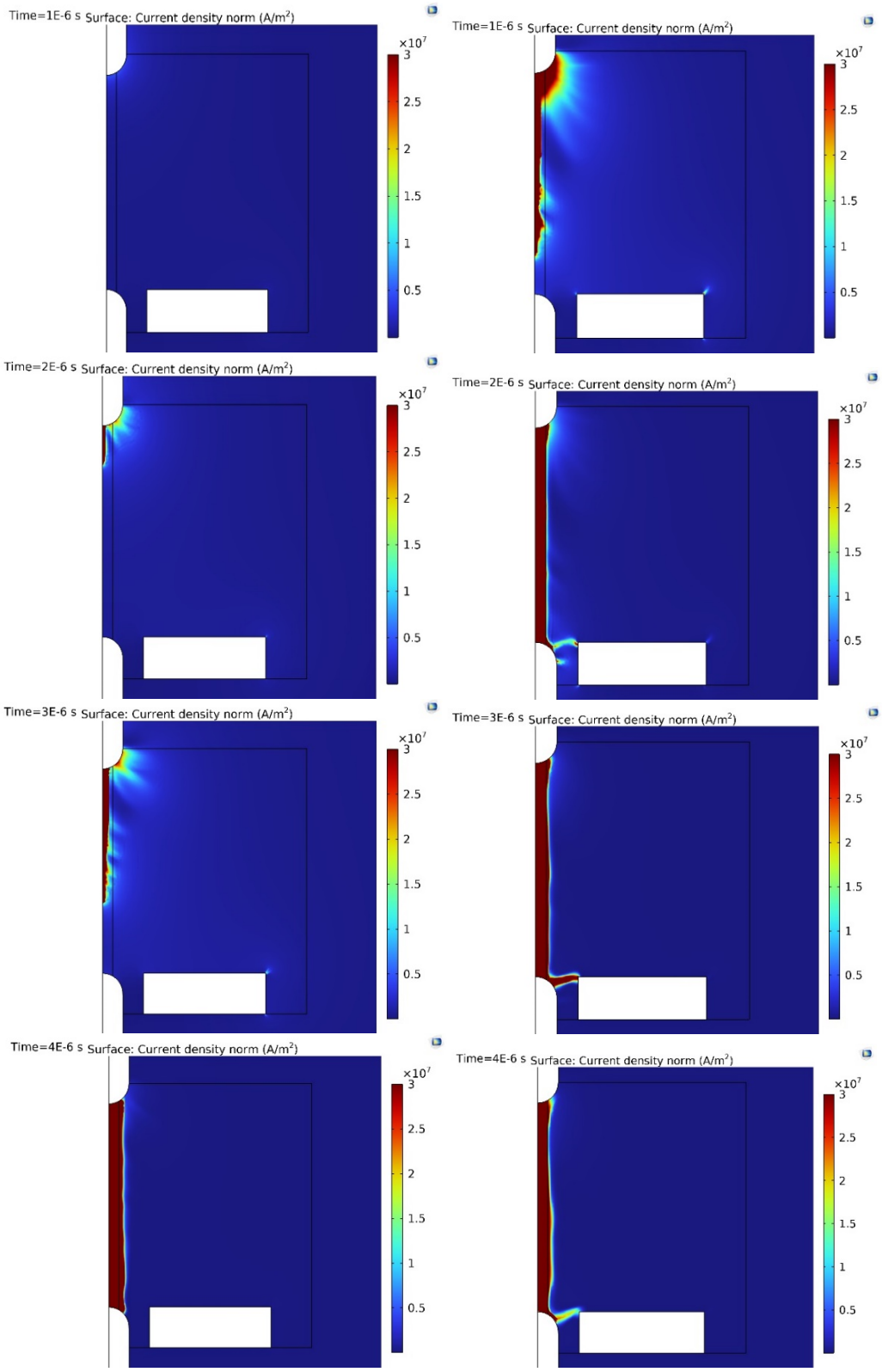


Рис. 4. Результаты моделирования распространения электрической дуги (с измерением плотности тока) при подаче тока с максимальным значением 2.5 кА (а) и 6.2 кА (б) (начало)

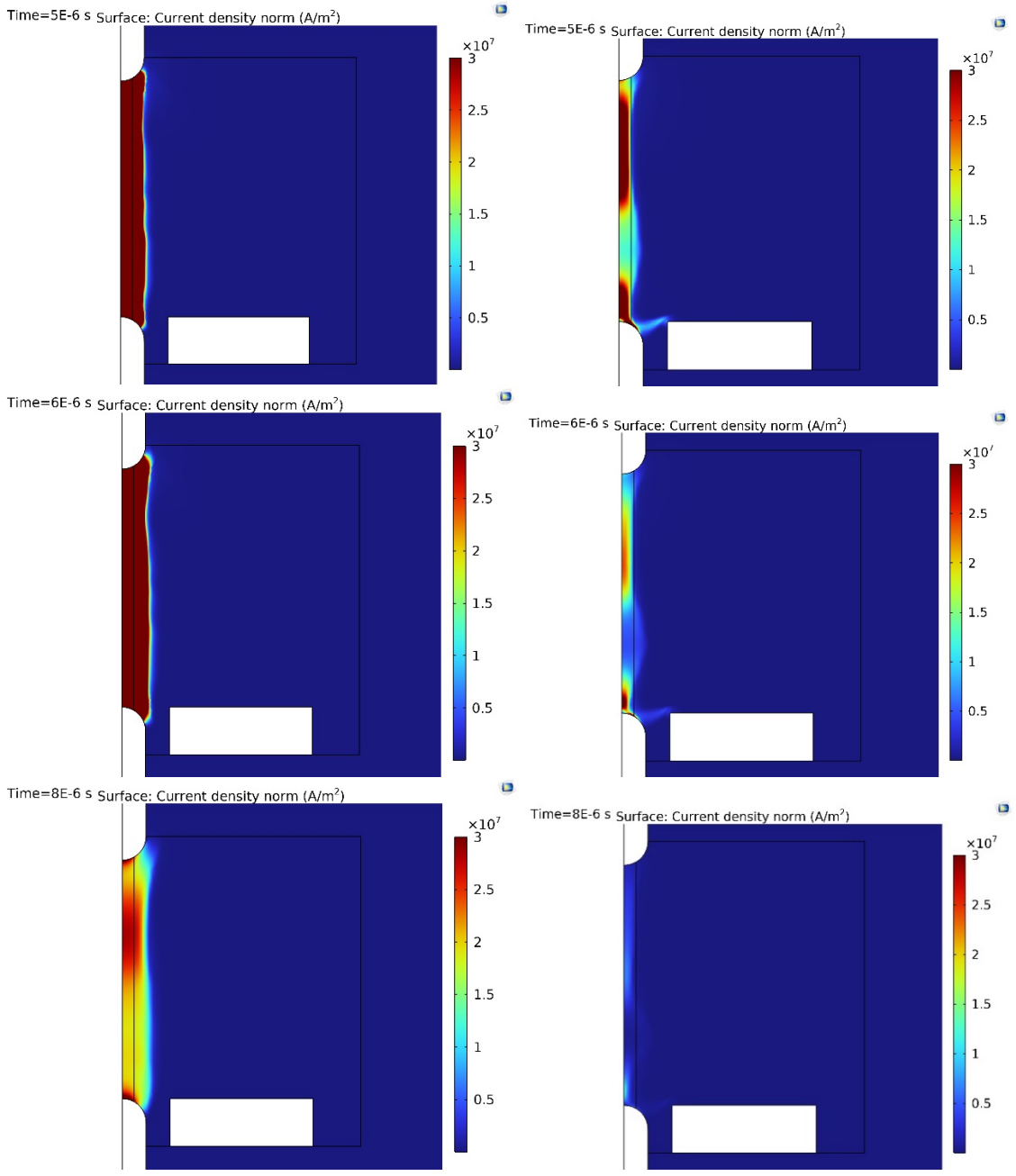
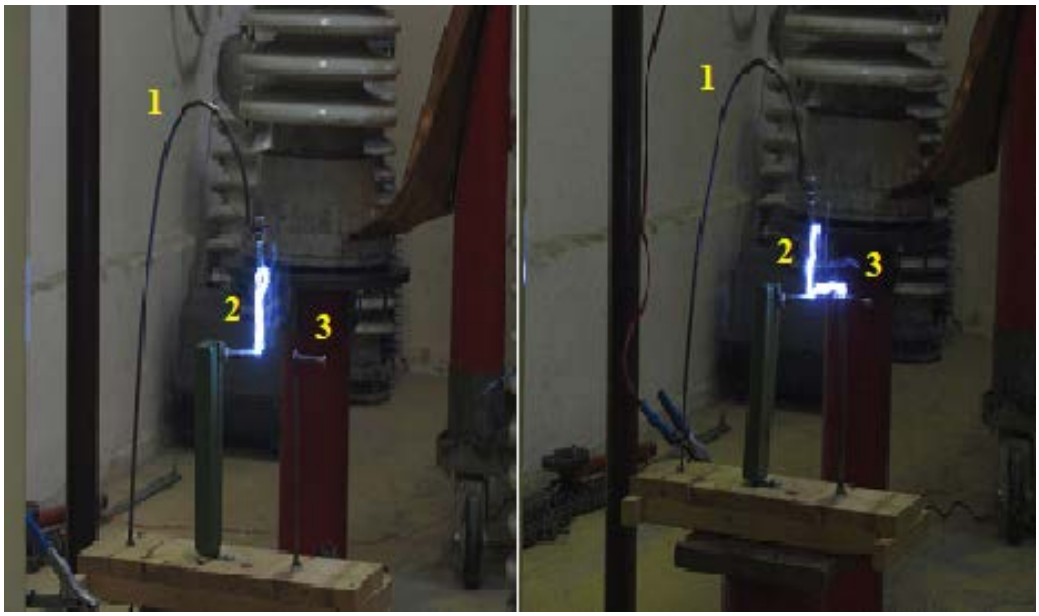


Рис. 4. Результаты моделирования распространения электрической дуги (с измерением плотности тока) при подаче тока с максимальным значением 2.5 кА (а) и 6.2 кА (б) (окончание)

Полученные результаты показывают, что с возрастанием величины подаваемого тока, действительно происходит переброска электрической дуги на защитный электрод, который, таким образом, предотвращает поломку защищаемого устройства.

Заключение. В данной работе была разработана методика расчета устройства, состоящего из разрядника и защитного искрового промежутка, проведен анализ математических моделей, применяемых для имитирования возникновения и развития электрической дуги. По критерию вероятно-

сти пробоя была определена область возникновения и распространения электронных лавин и стримеров, а также разработана модель импульсной дуги на основе уравнений МГД.



а ***б***

Рис. 5. Результаты эксперимента при подаче импульсного тока с максимальным значением 2.5 кА (а) и 6.2 кА (б)

Данный подход был использован для создания численной модели небольшого защитного промежутка, равного 2 мм. Кроме того, на высоковольтной установке был проведен эксперимент с защитным промежутком равным 50 мм при подаче токов с максимальным значением 2.5 кА и 6.2 кА. Полученные результаты показали принципиальную возможность перехода электрической дуги на защитное устройство, тем самым доказывая реализуемость концепции защитного электрода.

Работа выполнена в рамках исследований по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FSEG-2023-0012).

Список литературы

1. Фролов В.Я, Иванов Д.В, Сиваев А.Д, Чусов А.Н, Чистяков А.С, Рогожина А.А. Математическая модель дугогашения в соседних камерах молниезащитного мультикамерного разрядника РМКЭ-10. - Электричество, 2022, №7, с 40-51.

2. Podporkin G. Overhead lines lightning protection by multi-chamber arresters and insulator-arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, 26 (1):214-221, 2010.

3. Podporkin G. Development of multi-chamber insulator-arresters for lightning protection of 220 kV overhead transmission lines. XI SIPDA, pages 160-165, 2010.

4. Podporkin G.V, Enkin E.Yu, Zhitenev V.V, Zainalov R.I, Pilshchikov V.E, Belko D.O. Development of shield-type multi-chamber lightning arrester for 35kV OHL. 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneário Camboriú, Brazil, 28th Sept. – 2nd Oct. 2015.

5. Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Пильщиков В.Е. Разработка мультикамерной системы разрядников. – Электричество, 2013, № 1, с. 26–32.

6. Podporkin G. V, Enkin E. Yu, Kalakutsky E. S, Pilshikov V. E and Sivaev A. D. Lightning Protection of Overhead Lines Rated at 3-35 kV and Above with the Help of Multi-Chamber Arresters and Insulator-Arresters. 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, April 12 -16, 2010, Beijing, China.

7. Podporkin G.V, Enkin E.Yu, Kalakutsky E.S, Pilshikov V.E, and Sivaev A.D. Overhead Lines Lightning Protection by Multi-Chamber Arresters and Insulator-Arresters. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 26, NO. 1, JANUARY 2011.

8. Иванов Д.В., Подпоркин Г.В., Фролов В.Я. Моделирование нестационарных плазменных процессов в разрядной камере мультикамерного разрядника для молниезащиты линий электропередачи. – Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2016, № 2 (75), с. 128–133.

9. Frolov V., Ivanov D., Murashov I., Sivaev A. Mathematical Simulation of Processes in Discharge Chamber of Multi-Chamber System for Lightning Protection at Overhead Power Lines. 2016 IEEE NORTH WEST RUSSIA SECTION YOUNG RESEARCHERS IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING CONFERENCE, ELCONRUSNW 2016 St. Petersburg, 02-03 февраля 2016 г.

10. Chusov A., Podporkin G., Pinchuk M., Ivanov D., Murashov I., Frolov V. Development of a physical 2-D model for arc quenching chamber of lightning protection multichamber systems. 33RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, ICLP 2016 Estoril, Lisboa, 25-30 сентября 2016 г.

11. Подпоркин Г.В Молниезащита воздушных линий электропередач – СПб.: ИД «Родная ладога», 2015. – 176 с.

12. Murashov I., Safonov E., Markelov V. Numerical simulation of the outdoor insulator breakdown //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 643. – №. 1. – С. 012077. 54

13. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – С. 592.

14. Ramesh M. et al. Application of streamer criteria for calculations of flashover voltages of gaseous insulation with solid dielectric barrier //Proceedings of 18th International Symposium on High Voltage Engineeirng, Aug. 25-30, 2013, Seoul, Korea. – 2013. – С. 1258-1263.

15. Petcharaks K. Applicability of the streamer breakdown criterion to inhomogenous gas gaps: dis. – ETH Zurich, 1995.

16. Mauseth F., Jørstad J. S., Pedersen A. Streamer inception and propagation for air insulated rod-plane gaps with barriers //2012 Annual Report Con-

ference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – IEEE, 2012. – С. 732- 739.

17. Gleizes A. Thermal plasma modeling. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(9), 2013.

18. Yang F. low-voltage circuit breaker arcs-simulation and measurements. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 26(27), 2013.

19. Cressalt A. Properties of air-aluminium thermal plasmas. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(26), 2012.

20. Kloc P, Aubrecht V, Bartlova M, Coufal O. Radiation transfer in air and air-cu plasmas for two temperatures profiles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48(5), 2015.

21. Murmann M, Chusov A, Fuchs R, Nefedov A, Nordborg H. Modeling and simulation of the current quenching behavior of a line lightning protection device. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(10), 2017.

Чистяков Александр Сергеевич, аспирант, alexander30001@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Фролов Владимир Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, frolov_vya@spbstu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Подпоркин Георгий Викторович, д-р техн. наук, научный руководитель georgij.podporkin@streamer.ru, Россия, Санкт-Петербург, АО «НПО «Стример»

METHODOLOGY FOR INCREASING THE SERVICE LIFE OF LIGHTNING ARRESTERS

A.S. Chistyakov, V.Ya.Frolov, G.V.Podporkin

The method of increasing the service life of arresters designed for lightning protection of power lines is presented. With a lightning current that causes significant erosion of the arrester electrodes, transferring the discharge to an auxiliary protective electrode will significantly increase the life of the arrester, protect it from failure. A method for calculating a device consisting of a spark gap (or SPD) and a protective spark gap is presented, as well as an analysis of mathematical models used to simulate the occurrence and development of an electric arc. The area of occurrence and propagation of streamer lines was determined by the criterion of probability of breakdown, and a model of a pulse arc based on MHD equations was developed.

Key words: mathematical model, spark gap, streamer, electric arc, lightning protection.

Chistyakov Alexander Sergeevich, postgraduate, alexander30001@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Frolov Vladimir Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, frolov_vya@spbstu.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Podporkin Georgiy Viktorovich, doctor of technical sciences, chief research officer, georgij.podporkin@streamer.ru, Russia, St. Petersburg, Streamer Electric Company

УДК 537.523
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-80-81

РАЗРАБОТКА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА МУЛЬТИКАМЕРНОГО РАЗРЯДНИКА ЗАКРЫТОГО ТИПА

Е.Ю. Енькин, В.Я. Фролов, А.С. Чусов, А.Д. Сиваев

В данной статье представлена разработка устройства для аварийного, взрывобезопасного сброса давления мультикамерного разрядника закрытого типа РМКЗ-110. Дана численная модель, реализованная с использованием программной системы конечно-элементного анализа ABAQUS. В модели использовалась гибридная расчётная методика, объединяющая моделирование возникновения и развития электрической дуги с нарастанием давления в разряднике и анализ механической прочности его конструкции. Полученные результаты эксперимента и математического моделирования доказывают их качественное соответствие. Выработанные технические решения по повышению уровня взрывобезопасности, позволили успешно пройти все испытания и подготовить РМКЗ к опытно-промышленной эксплуатации.

Ключевые слова: молниезащита, разрядник, гашение дуги, математическая модель, взрывобезопасность.

Введение. Применение мультикамерного разрядника закрытого типа (РМКЗ) является перспективным решением проблемы молниезащиты воздушных линий 110 кВ. На определённом этапе разработчики разрядников закрытого типа столкнулись с проблемой взрывобезопасности, как и ранее разработчики ограничителей перенапряжений нелинейных ОПН [1,2].

Данная работа посвящена поиску новых технических решений по повышению уровня взрывобезопасности РМКЗ. В связи с этим был разработан гибридный экспериментально-расчётный метод оценки взрывобезопасности прототипа РМКЗ. Показано, что должного уровня взрывобезопасности можно добиться за счёт изменения конструкции фланцевого соединения: была использована комбинация из тонкой крышки и утолщённой крышки с разрезами

Использование закрытого корпуса в конструкции РМКЗ делает возможным неблагоприятный исход в случае аварийной работы устройства. При возникновении дуги короткого замыкания КЗ внутри корпуса РМКЗ создается избыточное давление, приводящий к его разрушению. В зависимости от величины тока КЗ процесс может усугубляться разлётом осколков.

Разработчики ОПН, давно столкнувшиеся с такой проблемой, для предотвращения подобных исходов проводят предварительные испытания на взрывобезопасность, регламентируемые специальным ГОСТ. В рамках проведённой нами научно-исследовательской работы были выработаны технические решения по повышению уровня взрывобезопасности.

Конструкция мультикамерного разрядника закрытого типа. РМКЗ предназначен для защиты ВЛ 110 кВ от всех типов грозовых воздействий.

Конструкция РМКЗ внешне похожа на конструкцию ОПН, однако в отличие от последнего вместо варисторов в РМКЗ используются разрядные модули (РМ), являющиеся по сути мультикамерными системами (МКС), выполненными в виде дисков из силиконовой резины (см. рис 1) с расположенными внутри миниатюрными металлическими электродами [3]. Между электродами сформированы специальные полости – разрядные камеры (РК) (на рисунке не показаны).

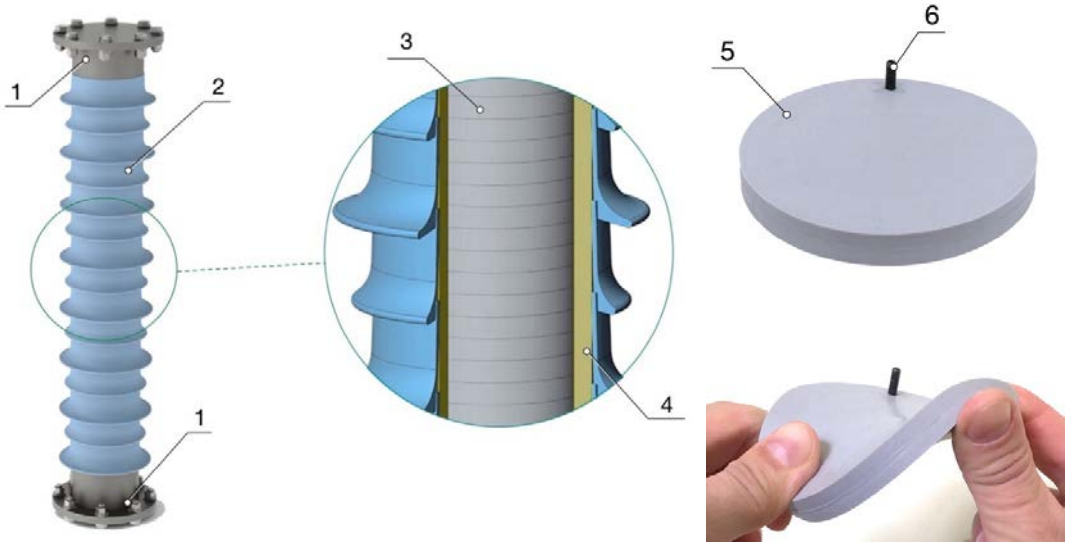


Рис. 1. Конструкция РМКЗ-110: 1 – верхний и нижний оконцеватели; 2 – оболочка корпуса; 3 – колонка разрядных модулей; 4 – стеклопластиковая труба; 5 – тело разрядного модуля; 6 – подводящий концевой электрод

Принцип работы разрядника РМКЗ. На ВЛ 110 кВ РМКЗ устанавливается параллельно линейной изоляции, при этом РМКЗ отделён от провода искровым воздушным промежутком (см. рис. 2). Под воздействием грозового перенапряжения происходит пробой искрового промежутка и срабатывание РМКЗ.

После протекания тока молнии мультикамерная система МКС разрядника препятствует возникновению тока КЗ сети за счёт суммарного падения напряжения на нескольких тысячах последовательно соединённых искровых промежутках, которое по величине существенно превосходит приложенное напряжение сети [4]. Общее время работы РМКЗ составляет менее 1 мс, что не чувствительно для микропроцессорных и релейных защит ВЛ. Аварийного отключения ВЛ не происходит.

Взрывобезопасность. РМКЗ, как и любые электротехнические устройства закрытого типа могут быть подвержены взрывному разрушению в результате воздействия избыточного внутреннего давления, вызванного горением дуги КЗ в корпусе устройства. Причиной возникновения дуги КЗ может быть нештатная работа РМКЗ, вызванная протеканием токов молнии экстремально высоких значений, при которых есть вероятность пробоя воздушного пространства внутри корпуса в обход МКС. Послед-

ствием взрывного разрушения может быть формирование осколков, разлёт которых в свою очередь может представлять опасность для персонала и близлежащего оборудования. Для предотвращения взрывного разрушения в РМКЗ необходимо предусмотреть устройство для аварийного сброса давления, которое необходимо разместить во фланцах.

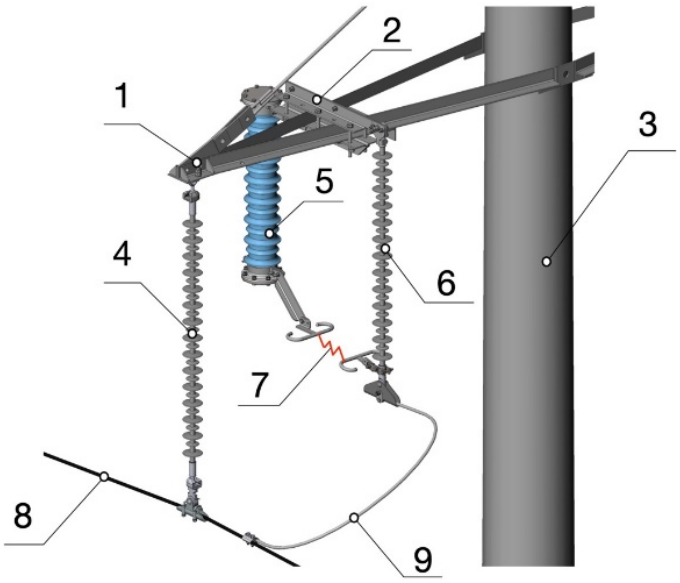


Рис. 2. Размещение РМКЗ на ВЛ-110 кВ: 1 – траверса опоры; 2 – выносная траверса РМКЗ; 3 – стойка опоры; 4 – линейный изолятор; 5 – РМКЗ; 6 – дополнительный изолятор; 7 – искровой воздушный промежуток; 8 – провод; 9 – шлейф

Испытания на взрывобезопасность проводятся в соответствии с процедурой, описанной в [5,6], в которую включены испытания как большим (40-80 кА), так и малым током (0,6 кА) короткого замыкания.

Для получения первичного представления об угрозе взрывного разрушения РМКЗ были выполнены исследования, с использованием экспериментального высоковольтного стенда, который обыкновенно используется для испытаний на отключающую способность (см. рис. 3). Стенд представляет собой два параллельно работающих блока: генератор импульсных токов (ГИТ), используемый для формирования импульсов молнии, и генератор сетевого напряжения и тока промышленной частоты [7].

По аналогии с ОПН для инициации дуги короткого замыкания применялась металлическая шунтирующая проволока, которая протягивалась по центру вдоль всей колонки разрядных модулей. Для формирования дуги с необходимым давлением с колебательно контура подавалось воздействие около 5 кА частотой 50 Гц. При горении дуги в закрытом объёме корпуса разрядника амплитуда тока снизилась в два раза и составила приблизительно 2,5 кА при длительности 1 полупериод. Однако, даже при таком относительно слабом воздействии получена деформация крышки фланца разрядника в 21 мм. Далее следовала задача разработки методики, которая сможет повторить вышеописанный эксперимент.

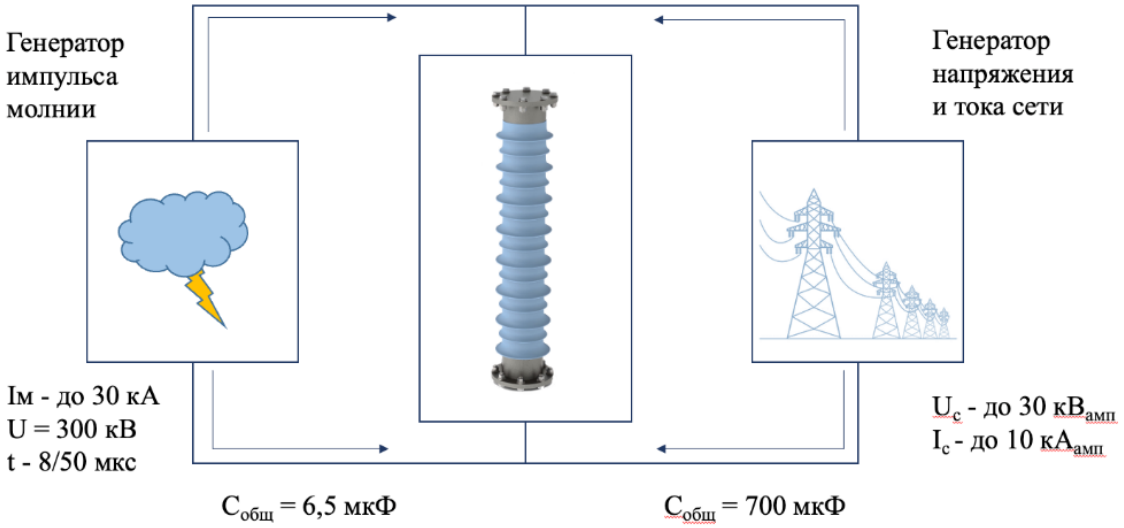


Рис. 3. Принципиальная схема испытательной установки

Гибридная методика расчета горения дуги и механической прочности разрядника. Для моделирования горения дуги тока короткого замыкания в корпусе РМКЗ используется известная модель дугового разряда [8-13]. Модель основана на гипотезе локального термодинамического равновесия, поэтому для описания исследуемых процессов применена система уравнений магнитной гидродинамики (МГД), использующая уравнения Навье-Стокса для проводящего сжимаемого газа, а также уравнения Максвелла:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \boldsymbol{u}}{\partial t} + \nabla(\rho \boldsymbol{u} \otimes \boldsymbol{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + [\boldsymbol{j} \times \boldsymbol{B}], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} h) = \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau u}) + \boldsymbol{j} \cdot \boldsymbol{E} + \nabla \cdot (\boldsymbol{q} + \boldsymbol{q_{rad}}). \quad (3)$$

Уравнения (1) и (3) дополнены уравнением состояния плазмы:

$$\rho = \rho(p, T). \quad (4)$$

В качестве исходных данных требуется задать термодинамические и транспортные свойства плазмы как функции давления и температуры. Для этого используются температурные зависимости удельных проводимости и теплоемкости. Важно отметить, что одним из главных механизмов теплопереноса является излучение.

Система уравнений (1) и (3) дополнена уравнением переноса излучения с целью дополнения представления процесса излучения во времени.

$$\boldsymbol{s} \cdot \nabla I_\nu(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{s}) = \kappa_\nu [I_\nu^b(T) - I_\nu(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{s})], \quad (5)$$

где $I_\nu(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{s})$ – интенсивность излучения в направлении $\boldsymbol{s}$, определяемая в точке $\boldsymbol{r}$, а $I_\nu^b(T)$ – функция Планка:

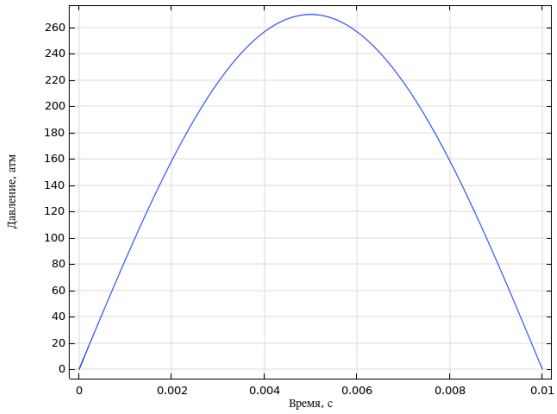
$$I_\nu^b(T) = \frac{2h}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}. \quad (6)$$

Численный подход, используемы при моделировании позволяет учесть разные нелинейные особенности, имеющие место в реальности, однако важно понимать, что численное решение является дискретным, в связи с чем необходимо проводить анализ сходимости с целью определения необходимого и достаточного количества разбиений как с точки зрения сходимости численного результата, так и с точки зрения рационального использования вычислительных ресурсов [14]. Для учета взаимодействия разрядника с сетью необходимо добавить уравнения электрического контура испытательной схемы, описывающие переходные процессы [15].

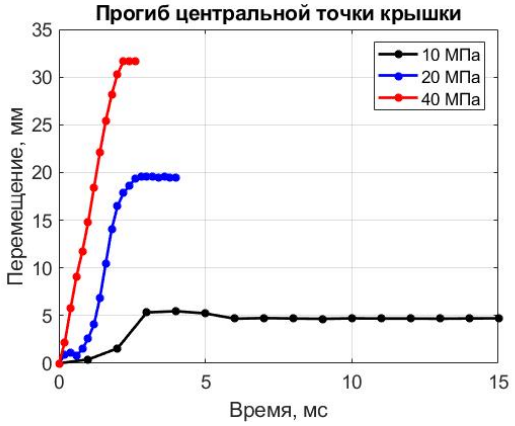
Разработанная модель использовалась для определения давления при протекании тока КЗ с учетом экспериментальных данных (Рисунок 3). Исходными данными для моделирования горения дуги КЗ является зависимость тока КЗ от времени с частотой 50Гц и представляет затухающую форму при первой амплитуде тока 30кА. Результаты моделирования представлены на Рисунке 4.

Численная модель реализована с использованием программной системы конечно-элементного анализа ABAQUS. Моделирование проводилось на 6-ядерном компьютере с процессором Intel i7 и 16 Гб RAM [16],[17].

В конечно-элементной модели используется около 100 тыс. линейных конечных элементов. Учитывается контактное давление между болтами, крышкой и вертикальной стенкой корпуса. В качестве модели материал для крышки, корпуса (сталь 20) и болтов (сталь 35ХМ) выбрана упругопластическая модель.



функция давления согласно расчету газодинамики с учетом плазмы дуги



влияние амплитуды давления на остаточный прогиб крышки

Рис. 4. Зависимости давления и остаточный изгиб крышки корпуса разрядника

В качестве граничных условий на плоскостях симметрии используются соответствующие условия симметрии, по внутреннему диаметру трубы приложена заделка, к внутренней поверхности крыши приложено давление как нестационарная функция согласно расчету газодинамики с уче-

том плазмы. Для валидации НДС УМЗ проведено многовариантное исследование влияния амплитуды давления на величину остаточного прогиба центральной точки крышки. На рис. 5 слева сверху представлено распределение вертикальной компоненты вектора интенсивности пластических деформаций в крышке. Подобный вариант конструкции позволяет демпфировать действие давления и не позволяет осколкам конструкции разлетаться в разные стороны. При установленном давлении 250 атм (рис. 4) соответствующая максимальная деформация составила 20.9 мм, что очень близко к измеренному значению иллюстрация рис. 5 справа сверху.

По разработанной методике проведен расчёт нескольких вариантов конструкций крышек для сброса давления и выбрана одна наиболее перспективная, состоящая из двух крышек с насечками. Результаты расчёта представлены на рис. 5 слева снизу. Данные расчёты прошли валидацию испытаниями с протеканием тока КЗ 63 кА, в соответствие с методикой [1,2]. На рис. 5 справа снизу приведена фотография образца РМКЗ после испытания. Можно констатировать хорошую сходимость результатов.

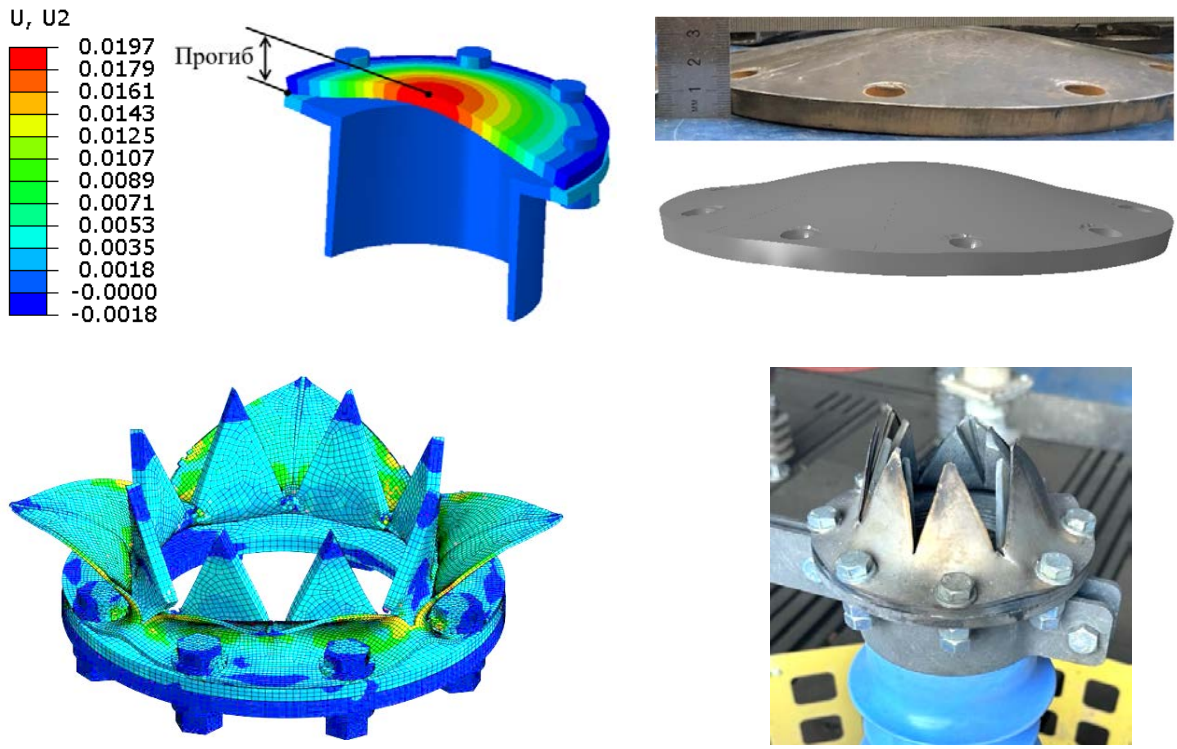


Рис. 5. Распределение интенсивности пластических деформации крышки фланца разрядника

Выводы. Как можно видеть, полученные экспериментальные результаты качественно отражаются расчетными данными, что дает основание утверждать об успешной валидации результатов исследований. Практически совпадают данные по пластической деформации материала крышки РМКЗ, кроме того, в области основания “лепестков”, образованных разрезами, наблюдаются значительные пластические деформации. Там, где

уровень деформации превышает предельное значение, образовались разрывы. При этом важно заметить, что наблюдаемые разрывы невелики и не могут привести к фрагментации крышки разрядника.

Работа выполнена в рамках исследований по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FSEG-2023-0012).

Список литературы

1. Дмитриев М.В. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6-750 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2009. 92 с.

2. Ozawa J., Mizukoshi A. Pressure relief design and performance of metal oxide surge arrester // IEEE Transactions on Power Delivery. 1986. Vol. 1. No. 1. pp. 151-156.

3. Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Калакутский Е.С., Пильщиков В.Е., Сиваев А.Д. Грозозащита ВЛ 10-35 кВ и выше при помощи мультикамерных разрядников и изоляторовразрядников // Электричество. 2010. №10. С. 11–16.

4. Подпоркин Г.В. Молниезащита воздушных линий электропередачи. СПб.: Родная Ладога. 2015. 176 с.

5. IEC 60099-4 Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems.

6. ГОСТ Р 52725-2021 Ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кв. Общие технические условия.

7. Будин А.В., Пинчук М.Э., Пильщиков В.Е., Лекс А.Г., Леонтьев В.В. Экспериментальный стенд для исследования устройств защиты воздуш-ных линий электропередачи // ПТЭ. 2016. № 5. С. 55-59.

8. Kumar P., Kale A., Ranade M., Internal arc fault simulation using CFD to predict thermal behavior in switchgear // Proceedings of the 2017 6th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA). 2017. pp. 236–241.

9. Li P., Ruan J., Huang D., OuYang Z., Long M., Wei M. Analysis of pressure rise in a closed container due to internal arcing // Energies. 2017. Vol. 10. No. 3. pp. 294.

10. Singh Sh., Summer R. Simplified internal arc-structural simulation // 21st International Conference on Electricity Distribution. Paper 1326. 2011. 4 p.

11. Kumar P., Kale A., Singh A.K., Ranade M. Internal arc fault simulation in medium voltage panel for thermal and structural withstand // IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. 2018. pp. 405-411.

12. Rümpler Ch., Chechare R., Zacharias A. Arc modeling in industrial applications // Plasma Physics and Technology. 2019. Vol. 6. No. 2. pp. 200-207.

13. CIGRE A3.24 working group. Tools for simulation of internal arc effects in MV and HV switchgear. IEEE Switchgear standard meeting. 2014. 63 p.

14. Mürmann M., Chusov A., Fuchs R, Nefedov A., Nordborg H. Modeling and simulation of the current quenching behavior of a line lightning protection device // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. Vol. 50. No. 10. pp. 12.

15. Chusov A., Chystiakov A., Apolinskiy M. Application of numerical simulations for improvement of line lightning protection device efficiency 2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cape Town, South Africa, 2022. P. 468-472. doi: 10.1109/ICLP56858.2022.9942457.

16. Chusov A., Chistyakov A., Michailov A., Apolinskiy M., Enkin E., Keresten I. Evaluation of Lightning Protection Device Fault Current Withstand Capability Using Numerical Simulations 2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA), Suzhou, China, 2023. P. 1-6. doi: 10.1109/SIPDA59763.2023.10349192.

17. Чусов А.Н., Аполинский М.И., Чистяков А.С., Сиваев А.Д., Енькин Е.Ю., Михайлов А.А., Керестень И.А. Применение математического моделирования для повышения взрывобезопасности устройств молниезащиты линий электропередачим // Материалы IX всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству 26-28.09.2023. С. 310-319.

Енькин Евгений Юрьевич, ведущий научный сотрудник, enkin@streamer.ru, Россия, Санкт-Петербург, АО «НПО «Стример»,

Фролов Владимир Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, frolov_vya@spbstu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Чусов Александр Николаевич, старший научный сотрудник, alexander.chusov@streamer.ru, Россия, Санкт-Петербург, АО «НПО «Стример»,

Сиваев Александр Дмитриевич, канд. техн. наук, советник генеральноо директора по науке и технике, alexander.sivaev@streamer.ru, Россия, Санкт-Петербург, АО «НПО «Стример»

DEVELOPMENT OF EXPLOSION-PROOF DESIGN OF THE HOUSING OF A CLOSED-TYPE MULTICHAMBER ARRESTER

E.Yu. Enkin, V.Ya. Frolov, A.N. Chusov, A.D. Sivaev

This article presents the development of a device for emergency, explosion-proof pressure relief of a closed-type multichamber arrester RMKZ-110. A numerical model is given, implemented using the ABAQUS finite element analysis software system. The model used a hybrid calculation technique combining modeling of the occurrence and development of an electric arc with an increase in pressure in a spark gap and analysis of the mechanical strength of its structure. The obtained results of the experiment and mathematical modeling prove their qualitative correspondence. The developed technical solutions to increase the level of explosion safety made it possible to successfully pass all tests and prepare the RMKZ for pilot operation.

Key words: lightning protection, spark gap, extinguishing, arc, numerical model, explosion safety.

Enkin Yevgeny Yuryevich, leading researcher, enkin@streamer.ru, Russia, St. Petersburg, Streamer Electric Company,

Frolov Vladimir Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, frolov_vya@spbstu.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Chusov Alexander Nikolaevich, researcher, alexander.chusov@streamer.ru, Russia, St. Petersburg, Streamer Electric Company,

Sivaev Alexander Dmitrievich, candidate of technical sciences, chief technical officer, alexander.sivaev@streamer.ru, Russia, St. Petersburg, Streamer Electric Company

УДК 537.523.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-88-89

СХЕМЫ ГРОЗОЗАЩИТЫ ДВУХЦЕПНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110 КВ С МОЛНИЕЗАЩИТНЫМ ТРОСОМ

Д.В. Коткин, Н.Д. Зарецкий, Е.Ю. Енькин, В.Я. Фролов, Д. Белько

В работе рассмотрены недостатки существующей молниезащиты для двухцепных воздушных линий (ВЛ) 110 кВ, оборудованных молниезащитным тросом (МЗТ). Предложено решение в виде инновационного устройства компании АО «НПО «Стример» в качестве дополнительной меры защиты двухцепных линий 110 кВ с МЗТ. Приведены результаты расчётов параметров воздействий молний на такие ВЛ в программной среде EMTP с помощью статистического метода Монте-Карло. Продемонстрированы различные схемы расстановки разрядников и их эффективность при защите от грозовых отключений.

Ключевые слова: молниезащита, грозовые отключения, обратные перекрытия, двухцепные воздушные линии, мультикамерные разрядники, метод Монте-Карло.

Введение. Протяжённость ВЛ 110 кВ в России составляет более 300 тыс. км [1]. При строительстве линий этого класса напряжения обязательной является установка молниезащитного троса [2]. При нормированном угле защиты трос предотвращает попадание прямых ударов молний (ПУМ) в фазные провода с вероятностью около 99% [3]. Однако аварийные отключения, вызванные грозовыми перенапряжениями, могут возникать и при ударах молнии в опору или МЗТ. Это происходит из-за так называемых обратных перекрытий: при стекании тока в землю на активном сопротивлении заземления и индуктивном сопротивлении опоры падает напряжение, инициируя перекрытие линейной изоляции и возникновение дуги короткого замыкания [4]. Таким образом, МЗТ не является гарантом отсутствия грозовых отключений ВЛ, а, значит, требуются дополнительные средства защиты. В качестве такой меры могут выступать мультикамерные разрядники.

Зачастую ВЛ 110 кВ имеют двухцепную конфигурацию опор для возможности передачи большей мощности, уменьшая габариты трассы ВЛ. В случае одноцепной конфигурации опор надёжная молниезащита обеспечивается установкой разрядников на каждую фазу. При условии эксплуатации двух цепей на одной опоре установка молниезащитных устройств на одной цепи может влиять на количество отключений на соседней цепи. В работе будет проведён количественный расчёт числа отключений для различных вариантов защиты с помощью средств математического моделирования. Стоит отметить, что математическое моделирование переходных процессов, происходящих в воздушных линиях при ударах молнии, производилось многократно и успешно применялось при разработке новых средств молниезащиты. Однако целью данной работы является оценка эффективности различных вариантов расстановки разрядников на двухцепные ВЛ 110 кВ. Критерий эффективности определяется как число отключений для каждой цепи. В качестве молниезащитных устройств при моделировании будут выступать разрядники нового поколения, рассчитанные на защиту ВЛ 110 кВ с МЗТ от обратных перекрытий.

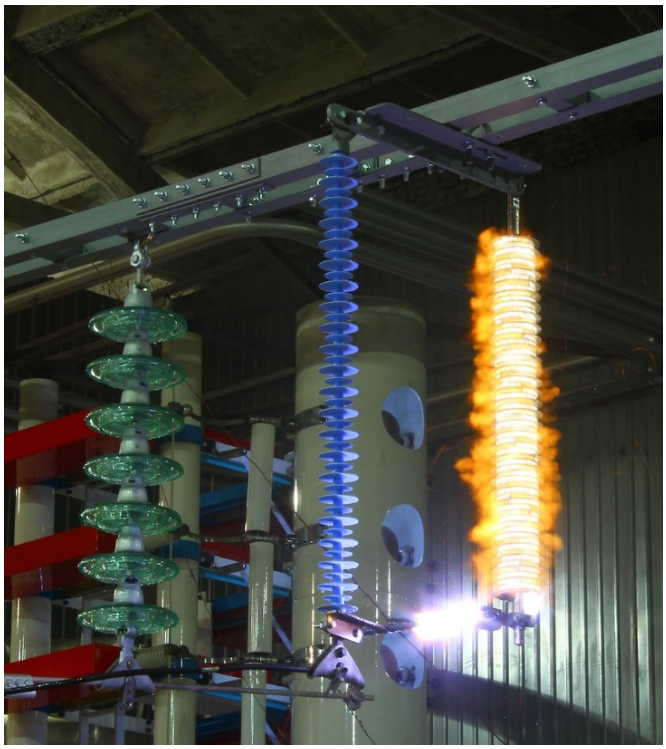


Рис. 1. РМКО-110 на испытаниях на координацию с линейной изоляцией

РМКО-110. В компании АО «НПО «Стример» разработан и успешно внедрён в эксплуатацию новый класс устройств для защиты ВЛ 110 кВ от ПУМ – разрядники мультикамерные закрытого типа РМКЗ-110. Конструкция и физический принцип их работы подробно описан в [5]. Однако для защиты линий, оборудованных МЗТ, РМКЗ-110 обладает избыточным запасом прочности, так как является прямым конкурентом ОПН 4-го и 5-го

классов пропускной способности. Токи обратных перекрытий существенно меньше, чем токи ПУМ [6], соответственно устройства, установленные под тросом, могут иметь конструктивные ослабления и, как следствие, более низкую стоимость. На базе технологии РМКЗ-110 были разработаны разрядники мультикамерные открытого типа – РМКО-110 (рис. 1), не имеющие корпуса и соответствующие 2-му классу пропускной способности.

Основным преимуществом этой линейки устройств является их режим работы – гашение электрической дуги «в импульсе». Это означает, что после прохождения тока молнии через разрядник сопровождающий ток сети не может возникнуть за счёт мгновенного восстановления электрической прочности после импульсного воздействия. Полное время работы устройства не превышает 1 мс, поэтому современная микропроцессорная защита на питающей ПС не «чувствует» возникающих перенапряжений и не отключает линию. В отличие от разрядников мультикамерных с гашением «в нуле», в которых основной износ при срабатывании происходит за счёт сопровождающего тока, разрядники с гашением «в импульсе» не имеют ограничений в применении по значениям токов коротких замыканий.

Расчётная методика по определению числа отключений ВЛ 110 кВ с молниезащитным тросом. Для оценки числа отключений ВЛ 110 кВ с молниезащитным тросом необходимо определить параметры молнии по [7]. Одним из таких параметров является число ударов молнии в линию, который зависит от грозовой активности в рассматриваемом регионе и конфигурации опоры:

$$N_{ПУМ} = 0{,}2N_g\left(\frac{b}{2} + 5h - \frac{h^2}{15}\right),$$

где N_g – число ударов молний в землю, ударов/км^2/год; b – ширина линии, м; h – средняя высота подвеса фазного проводника, м.

Для расчёта коэффициента перехода импульсного перекрытия в дугу тока промышленной частоты [2] в рамках задачи определения уровня грозоупорности ВЛ 110 кВ с молниезащитным тросом используется следующее выражение, определяющееся соотношением средней напряжённости поля сети вдоль пути перекрытия:

$$\eta = \left(1.6\frac{U_{нр}}{l_{разр}} - 6\right)\cdot 10^{-2},$$

где $l_{\text{разр}}$ – длина разрядного пути по гирлянде изоляторов, м; $U_{нр}$ – наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ.

Одним из ключевых факторов в представленной оценке является вероятность перекрытия изоляции или срабатывания разрядника, установленного на ВЛ 110 кВ. Для решения данной задачи используется программное обеспечение ATP-EMTP. В программном комплексе составляется электрическая схема замещения линии электропередач (рис. 2), отражающая реальное расположение фазных проводников, параметры опоры и конфигурацию ВЛ 110 кВ.

Схема замещения позволяет учесть электрические процессы, происходящие на линии при прямом ударе молнии в нее. Основными элементами схемы замещения являются:

- опора – представляет собой индуктивное сопротивление с погонным сопротивлением, отражающим материал конструкции опоры. Величина сопротивлений определяется исходя из высоты опоры и длины траверс;

- модель длинной линии – блок, отражающий материалы фазных проводников и их расположение;

- сопротивление заземления – для сравнительного анализа числа отключений и эффективности молниезащитных устройств рассматривается диапазон сопротивлений заземления от 5 до 100 Ом;

- модель разрядника – представляет собой вольт-амперную характеристику, полученную на основе опытов в испытательной лаборатории для разрядника РМКО-110.

В схеме замещения представлен источник молнии с помощью функции Хайдлера. Последний представляет собой блок, который по закону логнормального распределения генерирует параметры импульсов молнии – амплитуда тока молнии $I_м$, время фронта $t_ф$ и длительность до полуспада $t_{50\%}$. Форма импульса принимается по [11]. Статистический метод Монте-Карло включает в себя серию из 10000 ударов молнии в трос и опору. Из серии расчётов фиксируются только те импульсы, которые привели к срабатыванию разрядника или перекрытию изоляции. Отношение числа таких импульсов к общему числу ударов дает величину вероятности перекрытия изоляции или срабатывания разрядника.

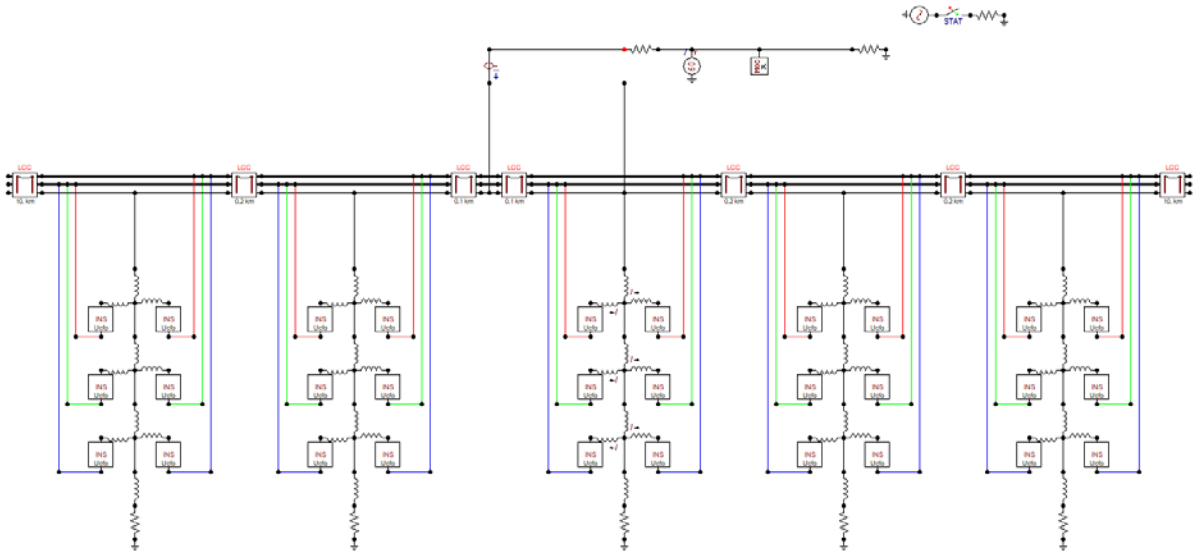


Рис. 2. Схема замещения ВЛ 110 кВ с молниезащитным тросом в программном комплексе ATP-EMTP при двухцепной конфигурации опор.

Технические решения по молниезащите линий электропередач 110 кВ под молниезащитным тросом. Для воздушных линий, трасса которых проходит на двухцепных опорах, существует два подхода к схемам

расстановки молниезащитных устройств. Первый подход предполагает установку разрядников на фазах каждой цепи. Эффективность от установки защитных аппаратов определяется их числом. При этом уровень грозоупорности при одинаковом количестве разрядников будет зависеть и определяться сопротивлением заземления опор. Для линий с установленным МЗТ предлагаются следующие схемы расстановки разрядников:

1. по 2 разрядника на опору на нижние фазы;
2. по 4 разрядника на опору на нижние и средние фазы;
3. по 6 разрядников на опору на все фазы.

Кроме того, помимо одновременной защиты обеих цепей, допускается защита только одной цепи разным количеством комплектов разрядников. Такой вариант позволит достичь нужной эффективности при меньших затратах на мероприятия по повышению грозоупорности ВЛ, а также актуален в том случае, когда отключения ВЛ фиксируются чаще всего на одной цепи, либо одна из цепей экранируется. Такой подход уменьшает число отключений не только защищаемой цепи, но и на второй цепи без разрядников, а также уменьшает общее число отключений ВЛ. Схемы расстановки разрядников для линий в двухцепной конфигурации представлены на рис. 3.

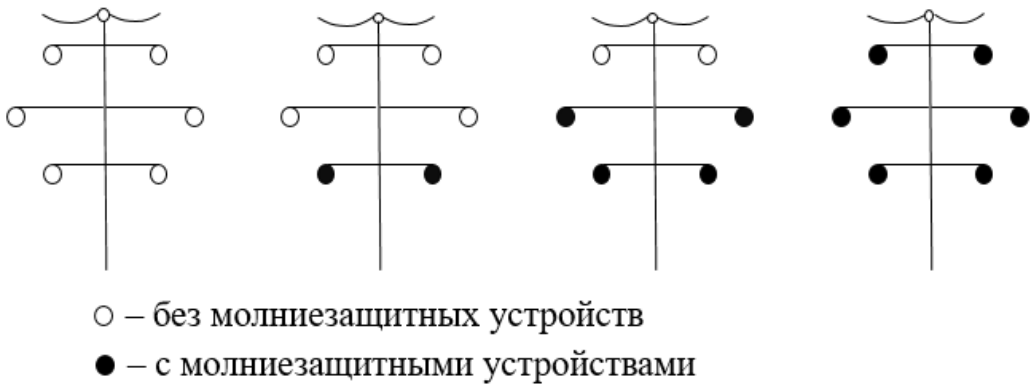


Рис. 3. Технические решения молниезащиты для воздушных линий 110 кВ, оборудованных молниезащитным тросом, на двухцепных опорах

Результаты расчета. Для анализа различных схем расстановки молниезащитных аппаратов используются следующие входные параметры:

Двухцепная воздушная линия 110 кВ с молниезащитным тросом;

Опора П110-4в с высотой опоры 31 м (рис. 4);

Импульсная прочность гирлянды изоляторов 7хПС70Е $U_{50\%}$=600 кВ;

Медианное значение максимума тока молнии и среднеквадратичное отклонение $\bar{I}$ = 31 кА, σ_I =0,29;

Распределение ударов опора–пролёт определялось исходя из длины пролёта и высоты опоры по следующему выражению [8]:

$$P_{on} = \frac{4 \cdot h_{on}}{l_{np}},\ P_{np} = 1 - P_{on}.$$

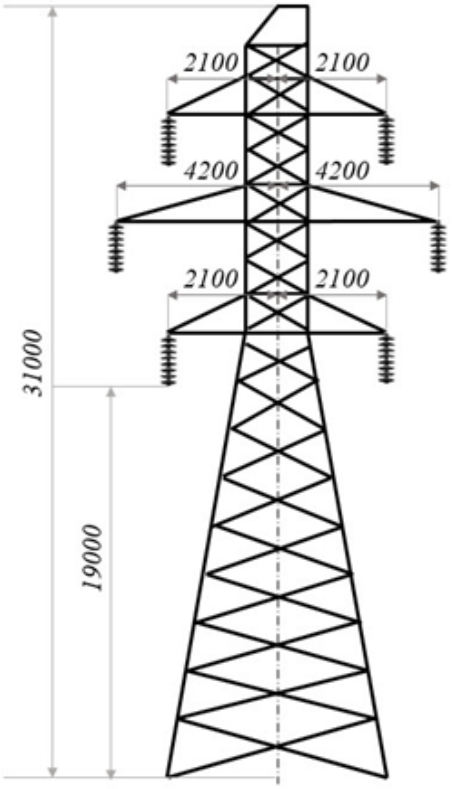


Рис. 4. Типовая опора П110-4в

На рис. 5 представлены расчётные кривые, отражающие число отключений воздушной линии 110 кВ, проходящих на опорах в двухцепном исполнении, для каждой из цепей. Из зависимостей видно, что с ростом сопротивления заземления увеличивается число отключений ВЛ без установки молниезащитных устройств. При попадании молнии в опору или МЗТ часть тока уходит через опору в землю. С ростом сопротивления заземления опор отвод тока затруднен, поэтому его часть начинает протекать через изоляцию, вызывая ее перекрытие. Установка мультикамерных разрядников позволяет уменьшить число отключений ВЛ 110 кВ. Тем не менее, эффективность по повышению грозоупорности зависит от числа установленных защитных аппаратов на опоре. Установка 1 комплекта разрядников РМКО демонстрирует эффективность на низких сопротивлениях заземления ввиду малой вероятности возникновения межфазных коротких замыканий. С увеличением сопротивления заземления необходимо устанавливать большее число разрядников на опору, так как шанс перекрытия последующих фаз возрастает. При сопротивлениях заземления свыше 100 Ом практически любая молния приведёт к перекрытию изоляции ввиду высокого потенциала на опоре. В таких случаях максимальную эффективность имеет схема с установкой 3-х комплектов разрядников. Число отключений при последнем варианте защиты демонстрирует наибольшую эффективность такого подхода, так как отсутствует зависимость от сопротивления заземления опор. В работе принято допущение о равномерности ударов молнии в каждую цепь при двухцепной схеме защиты. Таким обра-

зом, наблюдается тенденция по увеличению числа отключений с ростом сопротивления заземления опор и эффективности от установки разного числа разрядников.

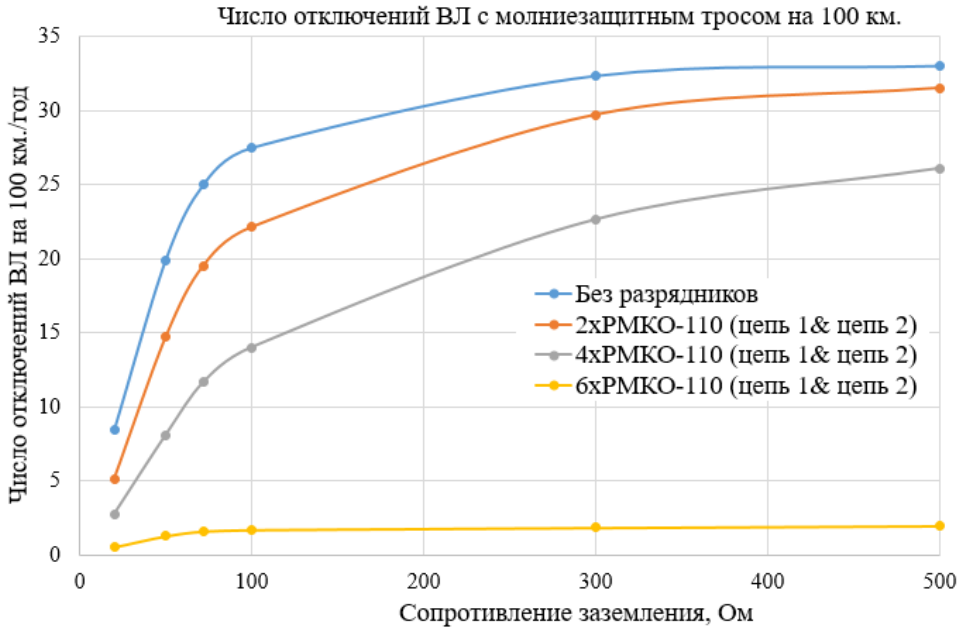


Рис. 5. Количество отключений ВЛ 110 кВ, оборудованной молниезащитным тросом, в зависимости от сопротивления заземления опор и установленных защитных устройств

В таблице представлено число отключений ВЛ 110 кВ с молниезащитным тросом на 100 км. длины линии и грозовой активности 100 г.ч. в случае защиты только одной цепи.

Число грозовых отключений ВЛ 110 кВ с молниезащитным тросом при защите только одной цепи

Сопротивление заземления опор, $R_з$, Ом	Количество грозовых отключений на 100 км при грозовой активности 100 г.ч.				
	Без разрядников			Разрядники на одной цепи	
	Цепь 1	Цепь 2	Общее число отключений	Цепь 1 (защищённая)	Цепь 2 (незащищенная)
20	8,4	8,4	16,8	1,4	7,3
50	19,9	19,9	39,8	3,3	18,0
70	25,0	25,0	50,0	3,9	22,9
100	27,5	27,5	55,0	4,4	26,0
300	32,3	32,3	64,6	4,6	31,1
500	33,3	33,3	66,6	4,9	32,1

Как можно наблюдать, такой вариант уменьшает количество отключений защищенной цепи более чем в 15 раз, а также позволяет уменьшить число отключений на незащищенной цепи. Импульсная прочность разрядника, по требованиям эксплуатации, должна быть на 10-15% меньше импульсной прочности линейной изоляции, установленной на ВЛ. В таком случае срабатывание разрядника происходит раньше, и линейная изоляция не перекрывается. При таких условиях очередность перекрытия меняется, и, таким образом, разрядники, установленные на первой цепи, уменьшают общее число отключений [12].

Выводы. При значительных величинах сопротивления заземления опор эффективность тросовой защиты снижается, поэтому необходимо принимать дополнительные меры по повышению грозоупорности ВЛ. В качестве подобных мер для защиты ВЛ 110 кВ с молниезащитным тросом предлагаются инновационные устройства нового поколения компании АО «НПО «Стример» – разрядники мультикамерные РМКО-110, способные обеспечить надёжную защиту от отключений при возникновении обратных перекрытий. Режим работы «в импульсе» обусловливает их преимущества в скорости отключения сопровождающего тока (менее 1 мс), а также отсутствии ограничений по величинам токов к.з. в месте установки.

Для линий в двухцепном исполнении существуют два подхода к их защите. При установке разного количества комплектов разрядников на фазы каждой цепи эффективность определяется числом защитных аппаратов на опоре. В случае защиты только одной цепи уменьшается количество отключений не только защищаемой цепи, но и незащищенной цепи, а также общее число отключений ВЛ. Такой подход экономически целесообразен и позволяет обеспечить достаточную защиту для различных условий эксплуатации.

Работа выполнена в рамках исследований по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FSEG-2023-0012).

Список литературы

1. Добрусин Л.А. Повышение энергоэффективности электросетевого комплекса России // Энергосбережение. 2013. № 7. С. 54-61.

2. РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6—1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений.

3. CIGRE Working Group C4.407 Lightning Parameters for Engineering Applications, August 2013.

4. Г.Н. Александров. Молния и молниезащита, Издательство «Наука», Москва. 2008. 274 с.

5. Е.Ю. Енькин, А.Д. Сиваев, А.С. Юль, Д.В. Коткин. Мультикамерные разрядники закрытого типа. Энергетик. 2022. № 12. С. 23-27.

6. D. V. Kotkin, E. Y. Enkin and D. O. Belko, "Developing a Line Lightning Protection Device to Protect 110 kV Overhead Lines with Ground Wire from Back Flashovers," 2023 Seminar on Industrial Electronic Devices and Systems (IEDS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023. P. 147-149.

7. Zaretskiy N., Kotkin D., Belko D., Enkin E. Lightning Protection of 110 kV Power Line with Overhead Ground Wire using Multi-Chamber Open Type Line Lightning Protection Devices // Proceeding of the 2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA), Suzhou, China. P. 1–6.

8. Belko D., Zinck M., Chuayin C. Simplified Method of Lightning Perfomance Assessment of OHL with Line Lightning Protection Devices. 2021, Peacon & Innovation.

9. Filipe N., Cardoso C., Mendes J., Leiria A., Duarte D., Perro L., Fernandes M.M. A methodology for estimating transmission lines lightning performance using a statistical approach, 33nd ICLP, 2016.

10. Dmitriev M.V., Evdokunin G.A., Gamilko V.A. EMTP Simulation of the secondary arc extinction at overhead transmission lines under single phase automatic reclosing // IEEE St.Petersburg PowerTech Proceedings, Report №15, June 27-30, 2005.

11. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std. 1410-2010.

12. Коткин Д.В., Зарецкий Н.Д., Белько Д.О., Енькин Е.Ю. Недостатки традиционных мероприятий молниезащиты воздушных линий 110 кВ и предложения по их устранению // IX Всероссийская научная конференция по атмосферному электричеству. С. 161-170.

Коткин Дмитрий Валерьевич, аспирант, dvkotkin@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,

Зарецкий Николай Дмитриевич, научный сотрудник, nikolay.zaretskiy@streamer.ru, Россия, Санкт-Петербург, АО «НПО «Стример»,

Енькин Евгений Юрьевич, ведущий научный сотрудник, evgeniy.enkin@streamer.ru, Россия, Санкт-Петербург, АО «НПО «Стример»,

Фролов Владимир Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, frolov.eed@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,

Белько Дмитрий, старший научный сотрудник, dmitry.belko@streamer.ru, Россия, Санкт-Петербург, АО «НПО «Стример»

LIGHTNING PROTECTION SCHEMES FOR 110 KV DOUBLE-CIRCUITS OVERHEAD POWER LINES WITH OVERHEAD GROUND WIRE

D.V. Kotkin, N.D. Zaretskiy, E.Yu. Enkin, V.Ya. Frolov, D. Belko

The paper considers the shortcomings of the existing lightning protection for 110 kV double-circuit overhead power lines equipped with an overhead ground wire. A solution is proposed in the form of an innovative device from Streamer Electric as an additional measure for protecting 110 kV double-circuit overhead power lines with an overhead ground wire. The paper presents the results of calculating the parameters of lightning impacts on such lines in the EMTP software environment using the Monte-Carlo statistical method. Various protection devices arrangement schemes and their effectiveness in protecting against lightning outages are demonstrated.

Key words: lightning protection, lightning outages, back flashovers, double-circuit overhead power lines, multi-chamber arresters, Monte-Carlo method.

Kotkin Dmitry Valerievich, postgraduate, dvkotkin@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Zaretskiy Nikolay Dmitrievich, research associate, nikolay.zaretskiy@streamer.ru, Russia, Saint-Petersburg, Streamer Electric Company,

Enkin Evgenii Yurievich, leading researcher, evgeniy.enkin@streamer.ru, Russia, Saint-Petersburg, Streamer Electric Company,

Frolov Vladimir Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, frolov.eed@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Belko Dmitry, research associate, dmitry.belko@streamer.ru, Russia, Saint-Petersburg, Streamer Electric Company

УДК 622.8:621.311.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-97-98

МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ ШАХТНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ТЕПЛА

А. Саббаган, В.Я. Фролов, Ю.Н. Кожубаев, А.А. Милицын, Р.В. Ершов

В этой статье рассматриваются методы утилизации шахтного газа, в частности для производства электричества и тепла, которые все больше изучаются в связи с растущими экологическими проблемами, такими как изменение климата, и острой необходимостью сокращения выбросов парниковых газов. Существует три основных типа шахтного газа: метан угольных пластов, шахтный метан и метан заброшенных шахт. Каждый тип имеет свои уникальные характеристики и проблемы, связанные с добычей и использованием. Метан угольных пластов состоит в основном из метана и может быть добыт независимо от добычи угля. В отличие от него, шахтный метан выделяется во время активной добычи и представляет собой риск для безопасности из-за своей воспламеняемости и взрывоопасности при определенных концентрациях в атмосфере. Кроме того, метан продолжает выделяться из заброшенных шахт, создавая проблемы и возможности с точки зрения воздействия на окружающую среду и извлечения энергии, соответственно. В статье рассматриваются различные методы добычи, включая вентиляцию и дренаж, которые необходимы для обеспечения безопасности горных работ при извлечении полезного метана для получения энергии. Авторы выделили инновационные технологии, позволяющие эффективно улавливать и утилизировать шахтный газ, такие как газовые двигатели и топливные элементы. Эти технологии могут преобразовывать метан в электричество и тепло, способствуя созданию более устойчивого энергетического ландшафта.

Ключевые слова: выброс метана, угольная шахта, двигатель на сжиженном газе, топливный элемент.

Шахтный газ связан с добычей угля. Как правило, способность горения газовоздушных смесей очень сложна, и если это невозможно, то система вентиляции предотвращает аварии, удаляя избыточный газ из шахты.

Это необходимо для защиты жизни рабочих. Это достигается установкой системы, которая реализована иначе, чем предыдущая. Среди преимуществ эвакуации шахтного газа во время или после добычи угля такие, как: Стандарты безопасности, сохранение и хранение шахтного газа как современного и сокращающего выбросы энергии источника парниковых газов, особенно в странах с высокой добычей угля. Если этот газ не хранить, то воздух, наполненный метаном, будет выходить в атмосферу. Таким образом, помимо создания проблем очень экологических, богатый источник энергии также будет потерян. Поэтому в последние годы, в связи с растущей обеспокоенностью по поводу ядерных отходов, ископаемых, проводятся обширные исследования в области использования возобновляемых источников энергии и менее рассматриваемых источников энергии. Угольный газ - один из таких источников энергии, извлечение которого рассматривается в данном исследовании. [1].

1. Типы шахтного газа. В зависимости от времени и способа добычи выделяют три различных типа минерального газа. Метан угольных пластов (МКУ). Метан угольных пластов, или газ угольных пластов (CSG), на 90 % состоит из метана и в некоторых районах может быть получен независимо от добычи. Причина высокой стабильности соединений этого газа заключается в том, что его можно получать непосредственно из сети. Для подачи газа и/или питания газовых двигателей или горелок он использовал печь.

Шахтный газ метан (ШМ). Этот газ представляет собой смесь метана и воздуха, выделяющуюся во время горных работ в шахтах. Он активен и должен быть удален из шахты по соображениям безопасности. Как правило, этот газ содержит 5 - 15 % кислорода и 25 - 60 % метана. Из-за возможности внезапного изменения соотношения метана и воздуха, использование этой газовой смеси в факелах или газовых двигателях может быть проблематичным.

Метан заброшенных шахт (АММ). Даже после закрытия шахты ее газовые выбросы продолжаются. Как правило, газ заброшенных шахт без кислорода содержит значительное количество углекислого газа (3-20 %) и скорость изменения его состава медленнее, чем у газа ШМ. Количество метана в этом типе газа варьируется от 40 до 80 %.

Новые методы использования и извлечения шахтного метана Шахтный метан (ШМ) присутствует в окружающей среде уже несколько десятилетий.Он использовался в разных странах мира, но коммерческое освоение этого источника газа А началось с 1990 года в Америке и других странах, таких как Китай, Россия, Восточная Европа и Индия. Инвестиции в разработку проекта Компания CMM International участвовала в проектировании системы добычи угольного газа. Все началось в непосредственной близости от газовых шахт. Примерно в 1990 году с помощью многосторонних концессий и низкопроцентных займов были представлены успешные демонстрационные проекты по извлечению шахтного газа, что открыло путь для инвестиций В настоящее время строятся ограниченные проекты CMM.

Исследовательская часть этих проектов находится в ряде стран была остановлена из-за технических препятствий, но в некоторых странах препятствия были преодолены, и были разработаны успешные проекты. В XXI веке добыча угля из действующих и заброшенных шахт получила широкое распространение. Уголь является одним из основных источников энергоснабжения в угледобывающих странах. Он был преобразован.Удаление газа из угольных пластов необходимо для обеспечения безопасности горных работ. Это не только увеличивает объем добываемого газа, но и повышает эффективность его эвакуации. К сожалению, в развивающихся странах темпы роста потребления (спроса) не успевают за ростом доступа к газовым ресурсам, что приводит к потере большого количества газа со средней теплотворной способностью в атмосферу. Кроме того, практически ежедневно через вентиляционные системы шахт выбрасывается большое количество газа с очень низкой теплотворной способностью. В данной статье обсуждаются и изучаются методы извлечения и использования этого ресурса, влияние изменений условий добычи, рынков и коммерческих технологий добычи газа из угольных пластов Стоуна.Сегодня, в связи с ростом цен на энергоносители и увеличением потребления электрической и тепловой энергии в различных отраслях промышленности, использованию данной технологии, особенно на предприятиях, расположенных в непосредственной близости от угольных шахт, уделяется большое внимание. [2-3].

2. Режим выделения метана. Явление выделения метана и безопасное удаление этого газа с помощью вентиляции в шахтах Подземный уголь - сложная тема. Одним из методов утилизации этого газа является метод эвакуации метана. Здесь частично рассматривается история этого метода и его применение. Упомянуты и способы его усовершенствования. Производство газа метана прямо пропорционально увеличению добычи угля. Поэтому основа стоимости избыточного угля, имеющегося с учетом дополнительных затрат на вентиляцию, равна Если метод эвакуации не используется, то он рассчитывается и измеряется. Количество метана Результат в виде коммерческих кредитов также зависит от количества энергии, используемой для выработки электроэнергии. Оценивается электроэнергия.

Выброс метана играет ключевую роль в борьбе с растущими тарифами на добычу полезных ископаемых, которая возникла недавно, и она справляется со своей задачей. Эта система решает проблемы публикации текстов из ликвидированных подземных шахт. Некоторые методы выполняются рутинно, а оптимальных методов не существует. В качестве окончательного решения проблемы выбросов метана был внедрен процесс подземной газификации угля (UCG). Изначально выбросы метана при добыче полезных ископаемых были сложным явлением в отрасли. Выброс этого газа через вентиляцию с помощью технологий, его сбор и реализовать многочисленные предложенные решения в этой области также очень сложно [4].

Одним из таких предложенных решений стал метод сжигания. При этом методе человека накрывают влажной тканью и с помощью вакуума удаляют метан из рабочей среды, отправляя внутрь. Эта работа должна проводиться в условиях, исключающих любое горение и воздействие на плотные слои метана. В том числе К преимуществам данного метода можно отнести высокую скорость этого процесса, низкую стоимость, а также отмечена высокая эффективность и отсутствие выделения загрязняющих веществ в окружающую среду. К недостаткам этого метода также можно отнести возможную опасность для человека, осуществляющего заправку, и большого количества рабочих, занятых в работе на данном участке шахты. Несмотря на расточительность Относительно высокие уровни продуктов сгорания при этом процессе для окружающей среды, концентрация углекислого газа В них содержится очень высокий уровень углерода и угарного газа, что повышает риск отравления. Этот метод повышает эффективность по сравнению с другими методами [5].

3. Использование и утилизация метана из вентиляционного воздуха угольных шахт. Для производства электроэнергии изучается топливная абсорбционная газотурбинная система FIGT Special, включающая комбинацию смеси метана и вентиляционного воздуха угольной шахты и метана, выбрасываемого из шахты угольной шахты, с входной концентрацией топлива 16 % метана. Однако полное сгорание метана с кислородом можно рассчитать по следующей формуле: Эта реакция представляет собой производство тепловой и электрической энергии путем сжигания метана. Формула горения метана (CH_4):

$$\mathbf{CH4 + 2O2 \rightarrow CO2 + 2H2O + Energy} \qquad (1)$$

Для сжигания этой очень разбавленной топливной смеси и выработки электроэнергии в турбине используется специально разработанная горелка, подключенная к турбине. Эта система защищена международным патентом.

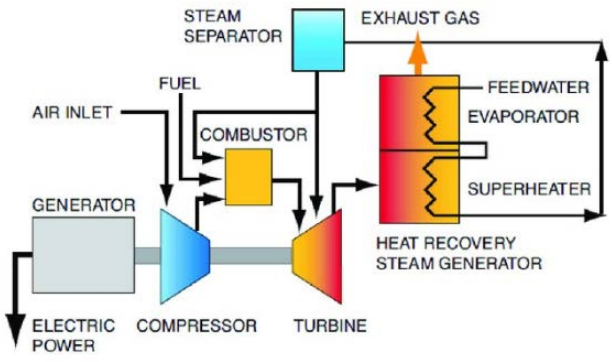


Рис. 1. Простая схема системы FIGT

Меры, принятые в рамках этого плана, включают:

1- Лабораторная работа над однотрубной камерой сгорания (реактором) на очень разбавленном топливе.

2- Компактная промышленная испытательная установка мощностью 200 кВт

3- Усовершенствованная турбина мощностью 2,5 мВт с моделью Centaur Solar FIGT 3000R.

Экспериментальная демонстрационная фаза была завершена, и общие проблемы эксплуатации были решены. Также было замечено, что условия в большинстве современных угольных шахт отличаются от того, как они эксплуатировались в Австралии до 1990 года, и что основная часть топлива угольных шахт содержит значительное количество метана в отводимом воздухе [6].

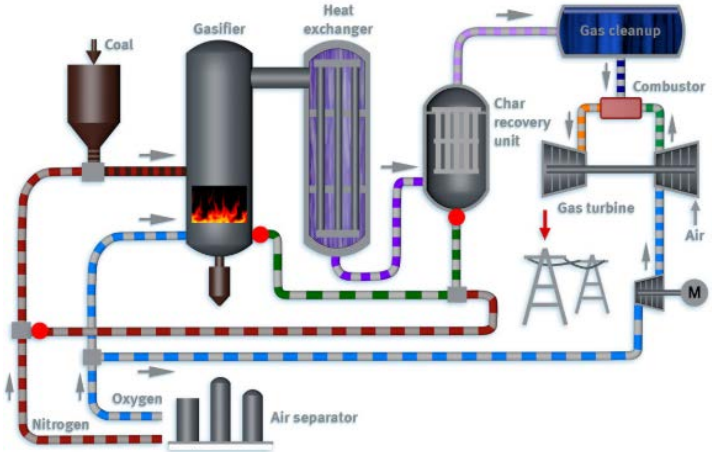


Рис. 2. Вид усовершенствованной системы газификации и осушки AIDG

В настоящее время большинство исследований сосредоточено на модификации газового топлива, которое может быть получено из недорогого угля или отходов угольного производства в газификаторах для совместной работы турбин. Разработка системы FIGT/AIDG может в будущем внести значительный вклад в решение проблемы остатков угольных шахт, сточных вод и повысить эффективность выходной мощности. Некоторые турбины и Solar Centaur, GE Frame-3, Frame-5 и т.д. подходят для методов FIGT/AIDG. Использование систем FIGT/AIDG - это недорогое решение с минимальным риском и очень высокой эффективностью. Эти системы в основном основаны на выбросах топливного угля или жидкого топлива на основе угля.

Технология двигателей на сжиженном газе: Наличие избытка воздуха в камере сгорания имеет два положительных последствия. Снижение температуры сгорания и уменьшение производства загрязняющих газов ХОН примерно в два раза. Повышение эффективности процесса сгорания и производство большей мощности из данного количества топлива благодаря наличию дополнительного кислорода. Технология разбавленного газа установлена в электрогенераторах Cummins на ТЭЦ Electable. При производстве электроэнергии в небольших масштабах двигатель на обедненном газе доказал свою топливную эффективность и чистоту сгорания на бесчисленных установках по всему миру. Любая реакция горения между воздухом и топливом требует источника энергии для первоначального сгорания. В обычных газовых двигателях эту энергию обеспечивает свеча зажи-

гания. В этих двигателях благодаря использованию первичной камеры предварительного сгорания процесс сгорания улучшается за счет предварительного смешивания воздуха и топлива перед поступлением в цилиндр с помощью турбокомпрессора. Благодаря этому в камеру сгорания поступает более богатая смесь, что уменьшает стук поршней и осечки топлива. Для предотвращения этих двух нежелательных явлений необходим постоянный контроль процесса сгорания с точки зрения температуры подаваемого воздуха, объемного соотношения топлива и воздуха и степени сжатия. Для этого контроллер двигателя управляет расходом топлива, воздушно-топливной смесью и фазами зажигания. В двигателях Cummins с обедненным сгоранием среднее отношение воздуха к газу составляет λ = 1,7, что показано на графике. Условия эксплуатации. Энергию, получаемую при сгорании метана, можно рассчитать, используя теплотворную способность метана. Теплотворная способность метана составляет около 55,5 МДж/кг. Произведенная энергия (E) рассчитывается по следующей формуле:

$$E = m \times \mathrm{LHV} \quad (1)$$

где m - масса метана, кг.; LHV - низшая теплота сгорания метана (в МДж/кг).

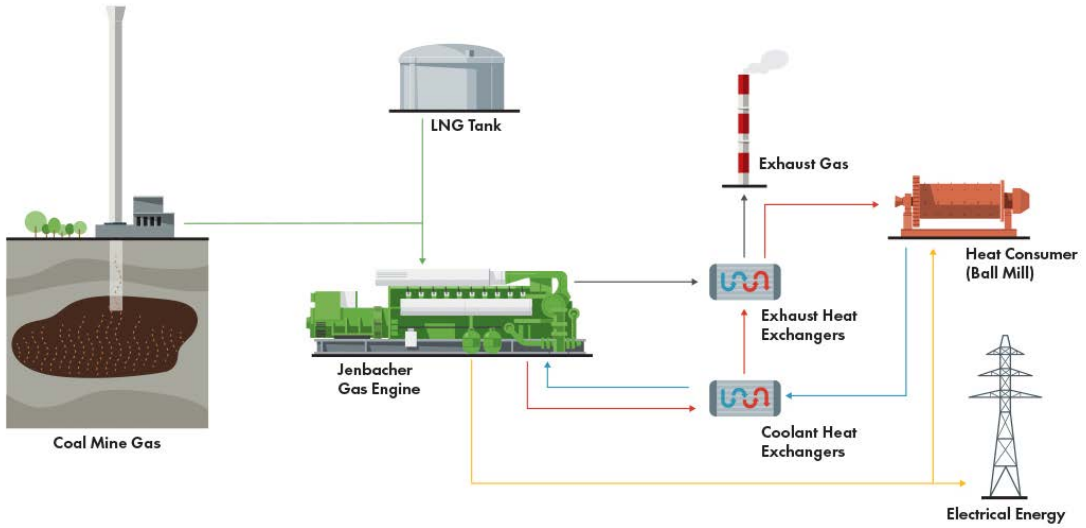


Рис. 3. Общий вид извлечения разбавленного газа метана из угольной шахты и сжигания его в газовом двигателе Pilot с последующей утилизацией его тепла в теплообменнике Н.

Эффективное давление сгорания (BMEP) подбирается таким образом, чтобы максимизировать эффективность и минимизировать производство NOx. Сгорание более богатой смеси приведет к большему стуку поршня и образованию NOx, а обедненной - к неполному сгоранию топлива, что может привести к осечкам. В полностью электронных двигателях датчики и микропроцессоры играют важную роль в поддержании условий сгорания [7-8].

4. Газовые двигатели, работающие на метановом газе из угольных источников. Производство электроэнергии с помощью газовых дви-

гателей с низким уровнем выбросов набирает обороты благодаря спросу на выработку электроэнергии моделями 2MHI xON, которые были разработаны с учетом минимального выброса пыли и CO2. Инновационные технологии для бестопливных двигателей с низким уровнем выбросов NOx были разработаны компанией с целью производства электроэнергии с самой высокой в мире эффективностью. Двигатели G-50MACH и G-60MACH представляют собой передовые поколения двигателей внутреннего сгорания, в которых особое внимание уделяется высокой эффективности, снижению выбросов загрязняющих веществ и оптимальному расходу топлива. Среди тех, кто добился больших успехов в мире экологически чистой и эффективной энергетики, были такие компании, как Mitsubishi Heavy Industries (MHI), разработавшие эти двигатели для удовлетворения растущего спроса на экологически чистую и эффективную электроэнергию среди энергоемкой промышленности и электростанций. Следующие разделы посвящены подробному описанию этих двух моделей. (рис. 4).

Таблица 1.

Информация о модели G-50 MACH

Характеристика	Описание
Двигатель	G-50MACH
Выходная мощность	Примерно 7000–8000 киловатт (в зависимости от конфигурации)
Технология сгорания	Многозарядная система зажигания с возможностью снижения выбросов NOx
Топливо	Способен работать на жидком топливе с низким расходом и экологически чистом
КПД	Более 45%, что делает его одним из самых эффективных двигателей в своем классе
Расход топлива	Оптимизирован для снижения расхода топлива и уменьшения операционных затрат
Применение	Подходит для средних электростанций и тяжелой промышленности

Таблица 2

Информация о модели G-60MACH

Характеристика	Описание
Двигатель	G-60MACH
Выходная мощность	Около 10000 киловатт или больше
Технология сгорания	Оптимизирована для дальнейшего снижения выбросов парниковых газов (CO2 и NOx) и твердых частиц
Топливо	Возможность использования комбинированного (гибридного) топлива и природного газа
КПД	Близко к 50%, что делает его одним из самых эффективных двигателей в мире
Расход топлива	Разработан для оптимального расхода топлива и снижения затрат на энергоресурсы
Применение	Идеален для крупных электростанций и энергоемких отраслей

Цель отдела исследований и разработок компании - использовать в этом типе двигателя газ метан, образующийся в верхних слоях и куполах угольных шахт. Концентрация газа метана в этих угольных шахтах составляет около 30-50%, и около 90% этого газа отправляется в атмосферу без какого-либо полезного использования. Парниковый эффект метана в 21 раз больше, чем у ОС2. Общий объем выбросов парниковых газов в мире в пересчете на ОС2 составляет около 500 миллионов тонн в год, и 40 % от этого общего объема выбросов в год приходится на Японию. Поэтому эффективное использование шахтного метана может стать действенным шагом на пути предотвращения глобального потепления.

В обычных двигателях, использующих систему искрового зажигания, топливно-воздушная смесь поступает в камеру предварительного сгорания со скоростью, примерно равной теоретическому соотношению топлива и воздуха. В случае резкого изменения концентрации топлива в системе искрового зажигания энергия сгорания и стабильность обедненных топливно-воздушных смесей в двигателях с экспериментальными системами микропилотного зажигания оказывается высокой. Другими словами, в этой системе сжигание метанового газа из угольных шахт с постоянно меняющимся количеством и концентрацией осуществляется желаемым и стабильным образом. Сравнение экспериментальной системы сгорания и системы зажигания показано на диаграмме рис.4. [9-10].

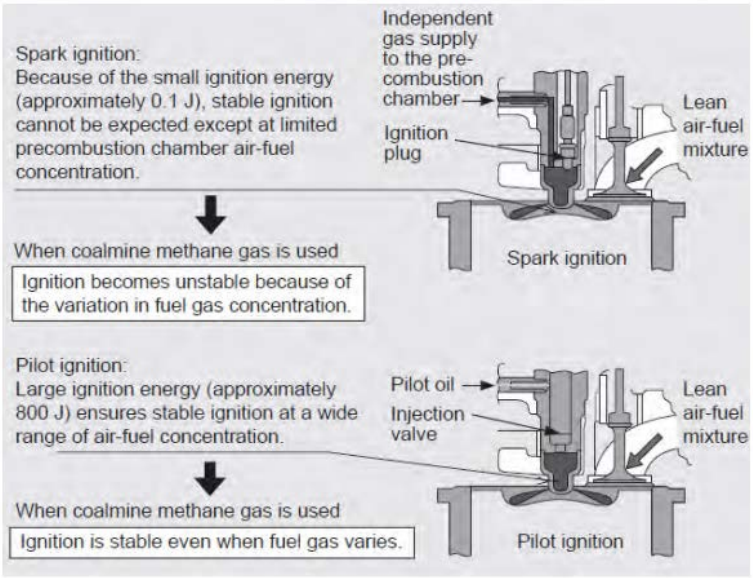


Рис. 4. Анализ различий между традиционными газовыми двигателями с двухколлекторной системой впрыска и двигателями с каталитической системой зажигания.

Анализ демонстрирует видение MHI относительно создания мощных, высокоэффективных систем и стабильно работающих двигателей с использованием шахтного метана в пилотной системе сгорания. MHI также продолжает свои усилия по коммерциализации этого газового двигателя [9].

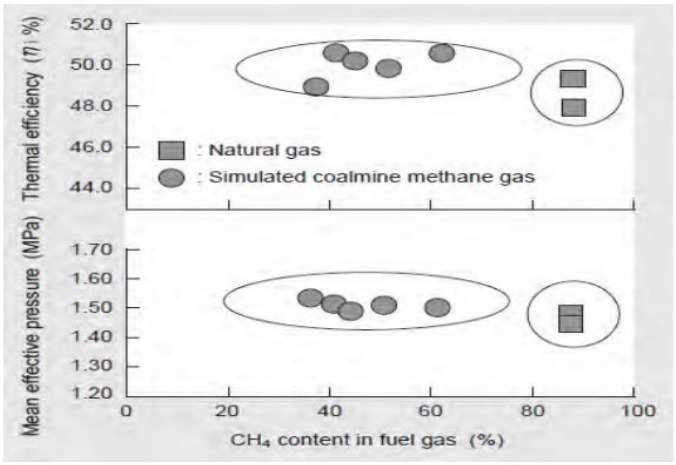


Рис. 5. Результаты эксперимента по моделированию сжигания метана угольных пластов, показывающие корреляцию между концентрацией метана и тепловой эффективностью и мощностью системы

5. Применение сжигания метана угольных пластов вместо природного газа. Использование шахтного метана для питания топливных элементов Несмотря на достижения в области топливных элементов и усилия по их коммерциализации, топливные элементы в настоящее время являются экономически конкурентоспособными только по сравнению с некоторыми методами производства электроэнергии. Использование рекуперированного шахтного метана в качестве топлива в топливных элементах может стать экономичным способом производства электроэнергии на электростанциях или для использования на месте. В некоторых местах (вокруг буровой площадки, где есть вероятность падения обломков) в атмосферу выбрасывается большой объем газа. Большая часть этого газа имеет среднее качество и не подходит для закачки в систему газопроводов. Однако использование этого газа в высокотемпературных топливных элементах позволяет сократить выброс метана в атмосферу при выработке электроэнергии на объекте, где используется данная система. Топливные элементы можно рассчитать с помощью фиксированной формулы:

$$\eta\text{Топливный элемент} = \frac{n\text{Произведенная электрическая энергия}}{2!\text{Химическая энергия топлива}} \times 100\% \qquad (2)$$

где η – эффективность топливного элемента, %.

Помимо того, что топливные элементы производят высокоэффективную электроэнергию, уровень выбросов углекислого газа в них гораздо ниже, чем при использовании других традиционных методов выработки электроэнергии, таких как турбины и системы внутреннего сгорания. Количество NOx, выбрасываемых системой твердооксидных топливных элементов (SOFC), составляет менее 0,5 ppm, а газы Sox CO , и несгоревшие углеводороды также не образуются во время работы этого элемента.Твердооксидные топливные элементы обычно производятся в диапазоне мощностей от 1 кВт до более чем 250 кВт в масштабах электростанции. В качестве электролита в таких элементах используются непористые оксиды металлов. Эти элементы работают в диапазоне температур от 650 до 1000

С. Ионная проводимость в этих элементах осуществляется ионами кислорода [11].

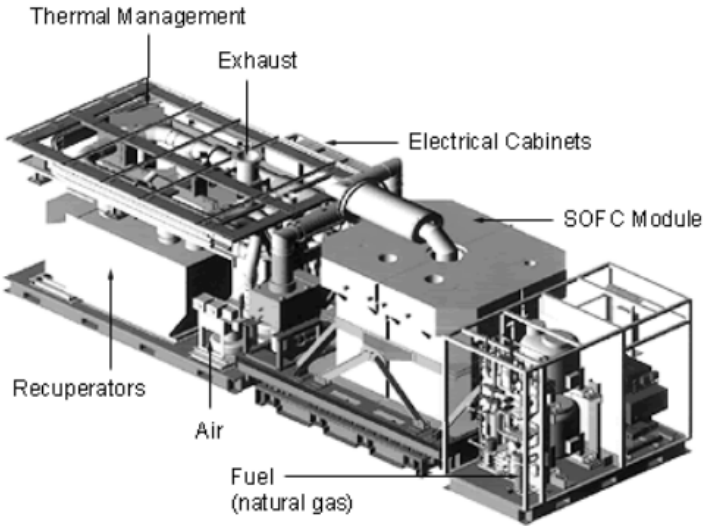


Рис. 6. Основные компоненты системы SOFC, работающей в настоящее время в Эссене, Германия

Благодаря стабильности керамических компонентов твердооксидных топливных элементов при более высоких температурах, гибкость типа топлива, потребляемого в этих элементах, высока, и они используются в комбинированных теплоэнергетических циклах (ТЭЦ). Электрический КПД этих элементов составляет около 60 %, который увеличивается до 85 % при использовании в комбинированных теплоэнергетических системах. Однако рассчитать энергоэффективность систем производства энергии можно в любой ситуации.

$$\eta = \frac{\text{Полезная энергия на выходе}}{\text{Энергия на входе}} \times 100\% \qquad (3)$$

η – энергоэффективность, %

Будущее угольной генерации электроэнергии. Перспективы угольной генерации быстро меняются, и угольные электростанции стремительно развиваются по всему миру. Однако из-за опасений по поводу выбросов парниковых газов, особенно углекислого газа, существует сильная оппозиция этим четырем электростанциям. Метод производства электроэнергии с помощью пылевидного угля (ПУ) вполне соответствует нормам выбросов, а газ CO2 может быть извлечен из газового топлива ПУ при геологических ограничениях. Этот метод предлагает потенциал для дальнейшего сокращения выбросов, а комбинированный цикл 5-фазной газификации (IGCC) предлагает значительно более дешевое хранение CO2. Сжигание этого топлива имеет аналогичный потенциал для коммерческого хранения CO2, но пока не очень хорошо развито. На сегодняшний день все еще не существует эффективного метода выработки электроэнергии из хранящегося CO2. Угольная технология с хранением CO2 является конкурентоспособным экономическим вариантом для производства электроэнергии. Чтобы обеспечить базовую нагрузку, необходимо закачивать пе-

ресыщенный CO2 в геологические системы, которые будут надежно храниться в течение многих лет. В этой области не существует нерешенных научно-технических вопросов, которые бы запрещали безопасную и эффективную закачку CO2. Формула расчета выбросов парниковых газов:

$$\text{Выбросы } \mathrm{CO2} = 1 + \frac{m\mathrm{CH4}}{M\mathrm{CH4}} \times M\mathrm{CO2} \quad (4)$$

Выбросы CO_2 – Количество выбрасываемого углекислого газа, кг; $m\mathrm{CH4}$ – масса потребленного метана, кг; $M\mathrm{CH4}$ - молярная масса метана, г/моль; $M\mathrm{CO2}$ – молярная масса диоксида углерода, г/моль.

Однако для реализации этого проекта в действительно коммерческих масштабах предстоит еще много работы [12-13].

Заключение. Как что Сказал стал Эта система Способность Производство электроэнергии и тепла Также время частицы для прямого объекта Он имеет Даже может Мощность С помощью газов Горячая Выход из газового двигателя И турбины Газ Для производства парогенератора Мощность В виде цикла Комбинированная рука Найдено . Учитывая запасы Очень много Слишком много угля камень В Иране, Использование Из этой системы переработки может Дело Внимание И расследования Больше назначений Возьмите его. Несмотря на близость некоторых промышленных предприятий к угольным шахтам, которые иногда используют это топливо в качестве сырья для печей, использование этого метода производства энергии наряду с другими методами WHRPG (такими как рекуперация тепла отходов) может быть использовано в комбинированном цикле. Кроме того, если расположить объект вблизи этих шахт и использовать их энергию для производства части энергии промышленной установки, то стоимость производства снижается. Таким образом, инвестируя и направляя политику энергетических исследований в этом направлении, можно достичь большого потенциала.

Список литературы

1. Overview and Outlook on Utilization Technologies of Low-Concentration Coal Mine Methane September 22, 2021 Xinxin Wang-Fubao Zhou-Yihan Ling-Yaning Xiao doi/10.1021/acs.energyfuels.1c02312.

2. Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction Özgen Karacan a, Felicia A. Ruiz b, Michael Cotè c, Sally Phipps.

3. Cost estimation of Non-CO2 greenhouse gas emissions reduction- A bottom-up analysis of coal-bed methane extraction and utilization in Shanxi, China Hengkang Wang a 1, Jie Shen b 1, Ji Gao c 1, Wei Wang

4. A novel method for estimating methane emissions from underground coal mines: The Yanma coal mine, China Zhong-Min Ji a, Zhi-Jian Chen a, Jie-Nan Pan b, Qing-He Niu.

5. Gas emission prediction and recovery in underground coal mines Leszek (Les) W Lunarzewski.

6. Managing Methane Emissions in Abandoned Coal Mines: Comparison of Different Recovery Technologies by Integrating Techno-Economic Analysis and Life-Cycle Assessment Yingjie-LiuHanbo-GaoZhijun Yu-Cheng Li doi/abs/10.1021/acs.est.2c02928.

7. Effects of H2 and CO enrichment on the combustion, emission and performance characteristics of spark ignition natural gas engine Zhuoyao He a, Zhan Gao a, Lei Zhu a, Shujing Li.

8. Effect of natural gas energy fractions on combustion performance and emission characteristics in an optical CI engine fueled with natural gas/diesel dual-fuel Zhaojun Zhu, Yikai Li, Cheng Shi.

9. Comprehensive review of methane conversion in solid oxide fuel cells: Prospects for efficient electricity generation from natural gas Turgut M. Gür.

10. Coal mine methane: Control, utilization, and abatement Satar Mahdevari.

11. Analysis of the explosion risk of low-concentration oxygen-bearing coal bed methane in the low-temperature environment Runzhi Li a b, Xiao Liu a, Zichao Huang c, Mengting Cao.

12. Polish energy policy 2050 – An instrument to develop a diversified and sustainable electricity generation mix in coal-based energy system Michal Wierzbowski, Izabela Filipiak, Wojciech Lyzwa.

13. Overview and Outlook on Utilization Technologies of Low-Concentration Coal Mine Methane Xinxin Wang-Fubao Zhou-Yihan Ling-Yaning Xiao doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.1c02312.

Саббаган Ареф, аспирант, aref.sn7040@gmail.com, Россия, Санкт-Петербургск, Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого,

Фролов Владимир Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, frolov_vya@spbstu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого,

Кожубаев Юрий Нургалиевич, канд. техн. наук, доцент, um-urii@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого,

Милицын Артем Алексеевич, сотрудник, militsyn.aa@edu.spbstu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого,

Ершов Роман Викторович, сотрудник, um-urii@mail.ru, Россия, Воркута, АО «Воркутауголь»

METHODS OF UTILIZING MINE GASES FOR PRODUCING ELECTRICITY AND HEAT

Aref Sabbagan, V.Ya. Frolov, Yu.N. Kozhubaev, A.A. Militsyn, R.V. Ershov

This article discusses methods for utilising coal mine gas, particularly for electricity and heat generation, which are increasingly being explored due to growing environmental

concerns such as climate change and the urgent need to reduce greenhouse gas emissions. There are three main types of coal mine gas: coalbed methane, coal mine methane and abandoned mine methane. Each type has its own unique characteristics and challenges associated with extraction and use. Coalbed methane consists primarily of methane and can be extracted independently of coal mining. In contrast, coal mine methane is emitted during active mining and poses a safety risk due to its flammability and explosiveness at certain atmospheric concentrations. In addition, methane continues to be emitted from abandoned mines, posing challenges and opportunities in terms of environmental impacts and energy recovery, respectively. The article discusses various extraction methods, including ventilation and drainage, which are necessary to ensure safe mining operations while extracting useful methane for energy production. The authors highlighted innovative technologies that can efficiently capture and utilize coal mine gas, such as gas engines and fuel cells. These technologies can convert methane into electricity and heat, helping to create a more sustainable energy landscape.

Key words: methane emissions, coal mine, liquefied gas engine, fuel cell.

Sabbagan Aref, postgraduate, aref.sn7040@gmail.com, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Frolov Vladimir Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, head of department, frolov_vya@spbstu.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Kozhubaev Yuri Nurgalievich, candidate of technical sciences, docent, um-urii@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Militsyn Artem Alekseevich, employee, militsyn.aa@edu.spbstu.ru, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Ershov Roman Viktorovich, employee, um-urii@mail.ru, Russia, Vorkuta, JSC Vorkutaugol

УДК 620.92
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-110-111

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Р.В. Ершов, Хаодун Чэн, А.В.Милицын, Ю.Н. Кожубаев, А.А. Милицын

В этой статье предлагается метод, который содержит модель экономической диспетчеризации виртуальной электростанции для ветровой, фотоэлектрической энергии и хранения энергии. Виртуальные электростанции могут осуществлять гибкую координацию, планирование и управление различными децентрализованными ресурсами, а также могут осуществлять взаимосвязь, преобразование и использование, а также совместную оптимизацию нескольких источников энергии, тем самым эффективно повышая региональную комплексную энергоэффективность и уменьшая загрязнение окружающей среды. постепенно стать ответом на национальное развитие. Это одно из важных средств решения проблем высокого энергопотребления и высокого загрязнения в процессе, поэтому оно получило широкое внимание со стороны академического сообщества.

Ключевые слова: Виртуальная электростанция, координация границ облака, экономическая отправка.

Энергия является основой человеческого развития и одним из важных компонентов человеческого общества. Однако в условиях глобального развития и постоянного ухудшения экологической среды традиционная энергетическая модель постоянно подвергается сомнению. Многие страны стремятся трансформировать модель развития энергетической отрасли.

Интеллектуальная система управления энергопотреблением (VPP), которая может интегрировать и координировать распределенные энергетические ресурсы для повышения гибкости, эффективности и устойчивости энергетической системы. По сравнению с традиционными электросетевыми системами виртуальные электростанции могут быстро реагировать на рыночный спрос и колебания энергии. В то же время, благодаря интеграции и координации распределенных энергетических ресурсов, они реализуют интеллектуальное и экологически чистое управление энергией.

Но по мере постоянного расширения масштабов электросети, стабильность и экономическая эффективность системы электроснабжения постоянно подвергаются испытаниям. На текущий момент эксплуатация электросетевой системы в основном сталкивается с тремя проблемами: экономическая диспетчеризация (economic dispatch, ED), оптимальный распределенный поток (optimal power flow, OPF) и управление блоками (unit commitment, UC). В данной статье выбрана экономическая диспетчеризация виртуальной электростанции в качестве направления исследования.

1. Экономическая диспетчеризация. Проблема экономической диспетчеризации — это задача оптимизации, целью которой является минимизация общих эксплуатационных затрат энергосистемы и удовлетворе-

ние спроса на электроэнергию и различных эксплуатационных ограничений. Традиционной задачей экономической диспетчеризации является определение активной мощности каждого теплоэнергетического энергоблока для минимизации общего расхода топлива (стоимости выработки электроэнергии) при условии соблюдения баланса мощности и границы мощности энергоблока. Однако с развитием новой энергетики отмечается [1-2], что доля новой энергии в энергоснабжении постепенно увеличивается и будет формироваться новая энергосистема, в которой доля новой энергии постепенно снижается. В будущем доля электроэнергии в виде терминальной энергии должна быть увеличена до 80%, доля не ископаемой энергии в производственной части должна достичь 80%, а установленная мощность чистой энергии, такой как фотоэлектрическая и энергия ветра будет увеличиваться с каждым годом. Проблемы экономической диспетчеризации становятся все более сложными.

Предложена модель [3] экономической оптимизации ветроэнергетики, добавляющая энергию ветра к традиционной экономической задаче диспетчеризации. Предложена виртуальная электростанция [4], состоящая из распределенной энергии ветра и накопителя энергии, для участия в модели диспетчеризации оптимизации энергосистемы, и проверена ее с помощью соответствующих методов. Предложена [5] двухуровневая оптимальная модель диспетчеризации для виртуальных электростанций, основанная на ценах на электроэнергию по времени использования, которая максимизирует виртуальные выгоды за счет изменений в методах работы. Предлагается [6] стратегия экономической диспетчеризации, которая учитывает стоимость углерода виртуальных электростанций и реакцию спроса на стороне пользователя для построения стратегии экономической диспетчеризации, включающей энергетическое взаимодействие между виртуальными электростанциями. Однако эти исследования основаны на одном распределенном ресурсе. Чтобы решить проблему оптимального экономического диспетчирования VPP под влиянием множества факторов, в данной статье предлагается модель оптимального экономического диспетчирования VPP, которая включает в себя накопление энергии, энергию ветра, двигатели внутреннего сгорания, солнечную фотоэлектрическую энергетику и другие факторы.

Для VPP поиск подходящей стратегии планирования ресурсов является наиболее важным вопросом. Мета эвристический метод используется [7] для достижения оптимального решения путем моделирования природы и человеческой мудрости. Используется [8] улучшенный алгоритм оптимизации роя частиц для рассмотрения проблем распределения мощности и экономической диспетчеризации микросотовых электромобилей для передачи энергии во времени и пространстве. Используется [9] многокритериальный алгоритм оптимизации роя частиц в сочетании с индикаторами условного риска и ошибками прогноза нагрузки для оптимизации эксплуатационных преимуществ VPP. Однако в сценариях большой размерности производительность этих методов будет серьезно снижена, и они могут

легко попасть в локальные оптимальные решения в процессе оптимизации, что приведет к низкой эффективности поиска.

С развитием глубокого обучения с подкреплением (DRL) DRL постоянно используется в области энергетических систем для решения экономических задач диспетчеризации. Используется [10] DRL для построения управляемой данными функции политики для невыпуклых нелинейных ограничений, избегая прямое решение. Используется [11] алгоритм Q-обучения для решения оптимального энергопотребления в различных типах областей энергопотребления. Предлагается [12] двухуровневая стратегия Q-обучения для решения задачи управления энергопотреблением распределенных источники энергии. Используется [13-14] глубокий детерминизм Алгоритм глубокого детерминированного политического градиента (DDPG) находит оптимальную стратегию управления аккумулятором. На основе этих исследований в данной статье выбран алгоритм PPO (Proximal Policy Optimization) в глубоком обучении с подкреплением (DRL) для решения проблемы экономической диспетчеризации VPP.

2. Облачная технология совместной работы. VPP, разработанный в этой статье, основан на архитектуре совместной работы на границе облака. Архитектура совместной работы на границе облака — это архитектура, сочетающая в себе облачные вычисления и периферийные вычисления. В этой архитектуре некоторые вычислительные задачи могут выполняться в облаке, а некоторые — на пограничных устройствах или пограничных узлах, обеспечивая более распределенную и интеллектуальную вычислительную нагрузку. Более того, облачный и пограничный уровни могут осуществлять двустороннюю передачу данных снизу вверх и сверху вниз для завершения командной координации бизнес-сервисов и сервисов приложений. Этот механизм двусторонней передачи данных позволяет облачному и пограничному уровням обмениваться информацией в режиме реального времени, а также корректировать и оптимизировать ее по мере необходимости.

Как показано на рисунке 1, на облачном уровне подплатформа рынка электроэнергии отвечает за использование VPP в качестве участника торгов для участия в транзакциях на рынке электроэнергии. Подплатформа диспетчерской информации отвечает за управление управляющей информацией и характеристиками электроэнергии. сеть, нагрузка и хранилище, чтобы гарантировать, что работа VPP соответствует системным требованиям. Субплатформа управления энергопотреблением отвечает за регулирование и мониторинг пользователей внутри VPP для достижения эффективного управления и распределения энергии.

Основная задача периферийного вычислительного терминала — проведение онлайн-операций в реальном времени. Он в основном отвечает за сбор и обобщение данных и использует модель, полученную на этапе автономного обучения, для онлайн-планирования в реальном времени.

Терминальный уровень — это в основном различные распределенные ресурсы и устройства в VPP, которые в основном отвечают за загрузку данных и получение управляющих инструкций.

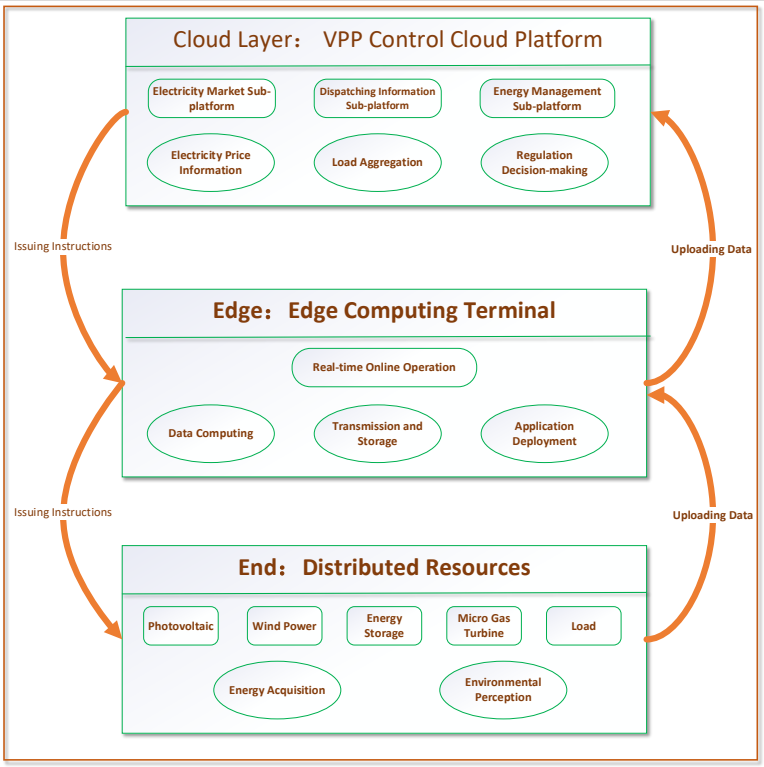


Рис. 1 Архитектура совместной работы

В архитектуре облачной совместной работы ключевым вопросом является использование интеллектуальных алгоритмов обучения с подкреплением и глубокого обучения для планирования работы облачной платформы.

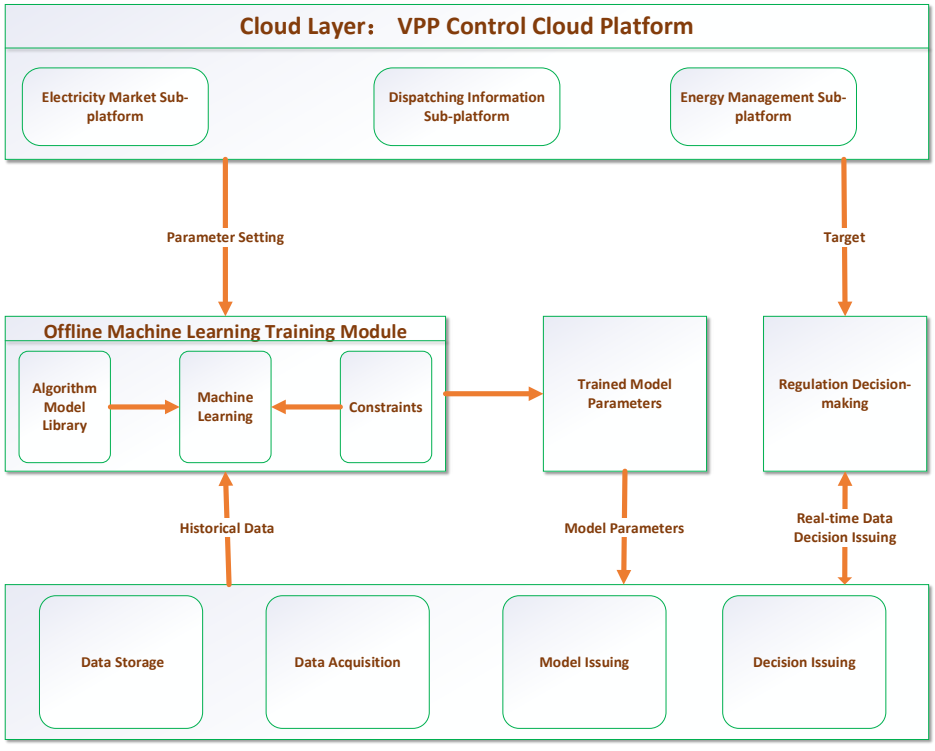


Рис. 2. Логическая схема облачной платформы управления

Как показано на рисунке 2, на этапе автономного обучения промышленный сервер и сервер электропитания отвечают за обработку и сбор информации на стороне производства электроэнергии и на стороне пользователя в определенной области и передают собранную информацию на облачную платформу управления VPP. Облачная платформа использует эти крупномасштабные офлайн-данные для обучения и оптимизирует стратегию планирования с помощью алгоритмов глубокого обучения с подкреплением. После завершения обучения обученная модель передается на периферийный вычислительный терминал в определенной области. Из-за большого количества пользователей виртуальной электростанции и необходимости реагирования на запросы в реальном времени серверы обеих сторон передают собранные данные в реальном времени на периферийный вычислительный терминал. Терминал периферийного агента использует предварительно обученную модель, вводит в нее данные в реальном времени и генерирует стратегии экономической диспетчеризации в реальном времени с помощью алгоритмов глубокого обучения с подкреплением.

Благодаря использованию облачной архитектуры совместной работы глубокого обучения с подкреплением работа VPP становится более надежной и безопасной, а планирование и управление ресурсами становится более интеллектуальным.

3. Диспетчерская модель экономической оптимизации. Модель, разработанная в этой статье, показана на рисунке 3 и включает в себя накопители энергии, солнечные фотоэлектрические системы, энергию ветра, микрогазовые турбины и нагрузки. Эти ресурсы подключены к общественной сети и участвуют в сделках на рынке электроэнергии. Целевая функция, разработанная в этой статье, направлена на снижение эксплуатационных затрат всей VPP.

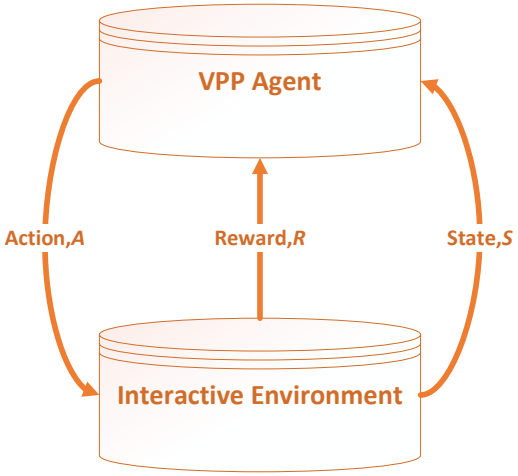


Рис. 3. Каркас конструкции VPP

Целевая функция:

$$F = \sum_{t=1}^{T} f_{mgt}(\mathrm{t}) + f_{bat}(\mathrm{t}) + f_{buy}(\mathrm{t}) \qquad (1)$$

где $f_{mgt}(\mathrm{t})$, $f_{bat}(\mathrm{t})$, $f_{buy}(\mathrm{t})$ представляет собой стоимость эксплуатации двигателя внутреннего сгорания, стоимость хранения энергии и стоимость покупки электроэнергии на рынке электроэнергии соответственно в течение времени t. В данной работе сумма этих трех затрат выбрана в качестве общей стоимости эксплуатации виртуальной электростанции.

$$f_{mgt}(\mathrm{t}) = \sum_{i=1}^{N_{mgt}} \left[a_{mgt} \left(P_{mgt,i,t} \right)^2 + b_{mgt} P_{mgt,i,t} + c_{mgt} \right] \Delta t \tag{2}$$

Это формула расчета эксплуатационных расходов двигателя внутреннего сгорания, где N_{mgt} представляет количество двигателей внутреннего сгорания, $P_{mgt,i,t}$ представляет собой выработку энергии определенного двигателя внутреннего сгорания в момент времени t, а a_{mgt}, b_{mgt}, c_{mgt} представляет три параметра выработки электроэнергии. стоимость двигателя внутреннего сгорания, и их значения фиксированы.

$$f_{bat}(\mathrm{t}) = \sum_{i=1}^{N_{bat}} c_{ess} P_{bat,i,t} \Delta t \tag{3}$$

Это формула расчета стоимости хранения энергии, где N_{bat} представляет собой количество единиц хранения энергии, c_{ess} представляет мощность зарядки и разрядки устройства хранения энергии, а $P_{bat,i,t}$ представляет мощность зарядки и разрядки i-го устройства хранения энергии в время t. Стоимость хранения энергии равна сумме затрат всех отдельных единиц хранения энергии.

$$f_{buy}(\mathrm{t}) = c_{buy,t} P_{buy,t} \Delta t \tag{4}$$

Формула расчета покупки электроэнергии на рынке электроэнергии относительно проста. В момент времени t он равен произведению рыночной цены электроэнергии $c_{buy,t}$ и объема покупки $P_{buy,t}$.

Ограничения баланса мощности:

$$\sum_{i=1}^{N_{wt}} P_{wt,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{sp}} P_{sp,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{mgt}} P_{mgt,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{bat}} P_{bat,i,t} + P_{buy,t} = \sum_{i=1}^{N_{el}} P_{el,i,t} \tag{5}$$

где $P_{wt,i,t}$ представляет собой мощность, вырабатываемую i-й ветряной турбиной в момент времени t, $P_{sp,i,t}$ представляет собой выработку энергии i-го фотоэлектрического блока в момент времени t, а $P_{el,i,t}$ представляет мощность i-й нагрузки в момент времени t. N_{wt}, N_{sp} и N_{el} - константы, обозначающие соответственно количество ветряных турбин, количество фотоэлектрических модулей и нагрузку.

Эксплуатационные ограничения блока внутреннего сгорания. Ограничения верхнего и нижнего пределов мощности агрегата внутреннего сгорания:

$$P_{mgt}^{\min} \le P_{mgt,i,t} \le P_{mgt}^{\max} \tag{6}$$

где $P_{mgt}^{\max}$ и $P_{mgt}^{\min}$ представляют собой верхний и нижний пределы мощности агрегата двигателя внутреннего сгорания.

Ограничения повышения мощности агрегата внутреннего сгорания:

$$P_{mgt,i,t} - P_{mgt,i,t-1} \le \Delta P_{mgt,i} \tag{7}$$

В формуле $\Delta P_{mgt,i}$ может представлять собой мощность ускорения двигателя внутреннего сгорания. Ограничения системы хранения энергии:

$$P_{bat}^{\min} \le P_{bat,i,t} \le P_{bat}^{\max} \tag{8}$$

$P_{bat}^{\max}$ и $P_{bat}^{\min}$ соответственно представляют собой верхний и нижний пределы мощности зарядки и разрядки устройства накопления энергии.

$$S_{soc}^{\min} \le S_{soc,i,t} \le S_{soc}^{\max}\ P_{mgt}^{\min} \le P_{mgt,i,t} \le P_{mgt}^{\max} \tag{9}$$

Среди них $S_{soc,i,t}$ представляет состояние заряда устройства накопления энергии, а $S_{soc}^{\min}$ и $S_{soc}^{\max}$ представляют собой верхний и нижний пределы уровня зарядки накопителя энергии соответственно.

$$S_{soc,i,t} = S_{soc,i,t-1} + \eta_{soc}\frac{P_{bat,i,t}}{E_{soc,i}}\Delta t \qquad P_{mgt}^{\min} \le P_{mgt,i,t} \le P_{mgt}^{\max} \tag{10}$$

где η_{soc} представляет эффективность зарядки и разрядки устройства хранения энергии, а $E_{soc,i}$ представляет емкость устройства хранения энергии.

(4): Ограничения интерактивной мощности

$$P_{buy}^{\min} \le P_{buy,t} \le P_{buy}^{\max}\ P_{mgt}^{\min} \le P_{mgt,i,t} \le P_{mgt}^{\max} \tag{11}$$

где $P_{buy}^{\min}$ и $P_{buy}^{\max}$ соответственно представляют собой верхний и нижний пределы интерактивной мощности VPP.

4. Моделирование Марковского процесса принятия решений (MDP). Марковский процесс принятия решений является математической основой обучения с подкреплением. Он может обеспечить математическую основу для моделирования решений. Марковский процесс принятия решений (MDP) может быть представлен четырехкортежностью.

$$MDP = (S, A, R, \gamma) \tag{12}$$

где S представляет собой набор состояний окружающей среды, A представляет собой набор действий, R представляет собой функцию вознаграждения, а γ представляет собой коэффициент дисконтирования, который представляет собой действительное число в диапазоне от 0 до 1.

В момент времени t агент выбирает действие a_t для взаимодействия с окружающей средой на основе текущего состояния окружающей среды s_t, получает вознаграждение r_t и переходит в следующее состояние s_{t+1}. Агент получает вознаграждение за каждый шаг взаимодействия с окружающей средой до конечного состояния. Используйте вознаграждение G_t для представления долгосрочной выгоды агента.

$$G_t = r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + \ldots + \gamma^{T-1} r_T = \sum_{i=0}^{T-t} \gamma^i r_{t+i} \tag{13}$$

где T —длина последовательности решений.

Функция значения действия Q используется для оценки качества действия a_t в состоянии s_t. Качество состояния оценивается функцией значения состояния V, а значение функции значения Q может использоваться для расчета V функция значения, которая определяется следующим образом:

$$Q_\pi(s,a) = E_\pi\left\{G_t \mid S_t = s, A_t = a\right\} \tag{14}$$

$$V_\pi(s) = \sum_{a\in A} \pi(a \mid sQ_\pi(s,a) \tag{15}$$

$\pi(a \mid s$ —Вероятность выполнения действия a в текущем состоянии s представляет собой стратегию агента.

Набор пространств состояний, выбранный в этой статье, включает в себя состояние заряда накопителя энергии, выходную мощность турбины, мощность энергии ветра, фотоэлектрическую энергию и нагрузку.

$$s_t = \{S_{soc,i,t}, P_{mgt,i,t}, P_{wt,i,t}, P_{sp,i,t}, P_{el,i,t}\} \tag{16}$$

Набор действий агента представлен серией переменных действия. В этой статье выбраны переменные решения: $P_{mgt,i,t}$ и $P_{bat,i,t}$.

$$a_t = \{P_{mgt,i,t}, P_{bat,i,t}\} \tag{17}$$

Функция вознаграждения побуждает агента предпринимать действия, которые минимизируют эксплуатационные расходы, сохраняя при этом ограничения баланса сил.

$$r_t = -\sigma_1\left[f_{mgt}(\mathrm{t}) + f_{bat}(\mathrm{t}) + f_{buy}(\mathrm{t})\right] - \sigma_2 \Delta P_t \tag{18}$$

где ΔP_t —Дисбаланс мощностей в момент времени t

$$\Delta P_t = \left| \sum_{i=1}^{N_{bat}} P_{bat,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{mgt}} P_{mgt,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{wt}} P_{wt,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{sp}} P_{sp,i,t} + P_{buy,i,t} - \sum_{i=1}^{N_{el}} P_{el,i,t} \right| \tag{19}$$

где σ_1, σ_2 —коэффициент контроля вознаграждения

5. Алгоритм Оптимизация проксимальной политики. Алгоритм PPO (Proximal Policy Optimization) — это основанный на стратегии метод обучения с подкреплением, предложенный OpenAI. Чтобы преодолеть проблемы низкой эффективности выборки и нестабильного обучения традиционному методу градиента политики, PPO вводит механизм пропорционального ограничения важности, который ограничивает амплитуду каждого обновления политики путем ограничения целевой функции, тем самым улучшая стабильность и эффективность выборки. Алгоритм PPO — это алгоритм обучения с подкреплением, основанный на платформе Actor-Critic (AC). Платформа AC включает сети Actor и сеть Critic. Сеть Actor в основном используется для создания функций политики. Сеть критиков в основном используется для оценки действий, предпринятых действующим лицом, чтобы сеть актеров могла улучшить функцию политики.

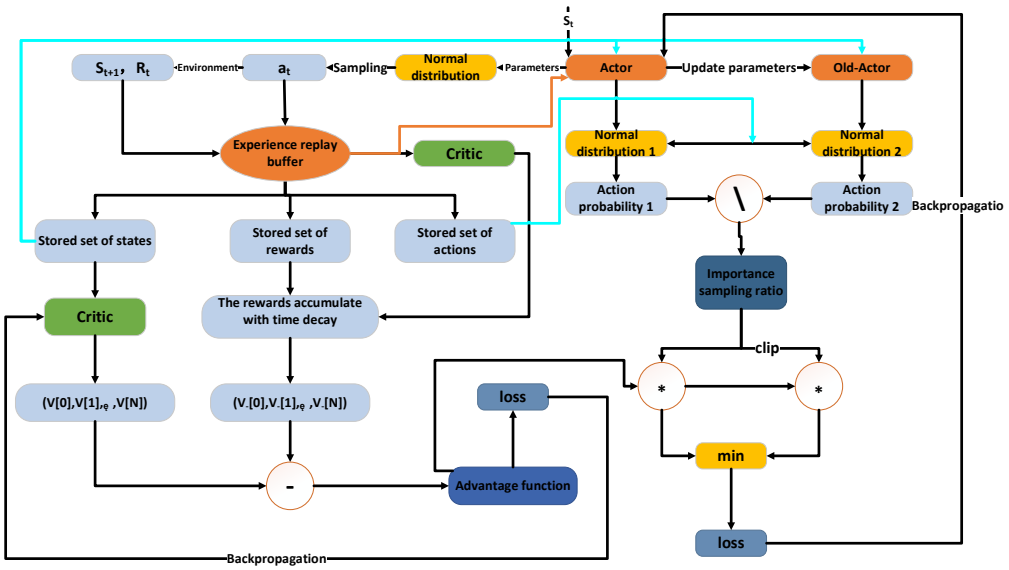


Рис. 4. Схема обучения алгоритма PPO

Сеть Actor в основном обновляет параметры сети, оптимизируя функцию потерь. Функция потерь определяется следующим образом:

$$J^{clip}(\theta) = E_{(s_t,a_t)\square\pi(;;\theta_{old})}\begin{bmatrix}\min(r_t(\theta)A(s_t,a_t), clip(r_t(\theta),1-\\ \varepsilon,1+\varepsilon)A(s_t,a_t))\end{bmatrix} \tag{20}$$

где $A(s_t,a_t)$—функция преимущества

$$A(s_t,a_t) = y_t - V_\omega(s_t) \tag{21}$$

$$y_t = R_t + \gamma V_\omega(s_{t+1}) \tag{22}$$

где $V_\omega(s_t)$ — выходное значение сети Critic в момент времени t; R_t— вознаграждение в момент времениt; ω — параметр сети Critic; y_t— оценочное значение $V_\omega(s_t)$ в момент времени $t+1.\theta$—Параметры сети, обновите размер θ с помощью метода градиентного подъема.

$$\theta \leftarrow \theta + \sigma^A \nabla_\theta J(\theta) \tag{23}$$

где σ^A — скорость обучения сети Actor; $r_t(\theta)$—Коэффициент выборки важности . это отношение новой функции распределения политики к старой функции распределения политики.

$$r_t(\theta) = \frac{\pi_\theta(s_t \mid a_t)}{\pi_{\theta_{old}}(s_t \mid a_t)} \tag{24}$$

где ε— коэффициент отсечения. это гиперпараметр, используемый для измерения степени отклонения между новой стратегией и старой стратегией. Поскольку расстояние обновления между новой стратегией и старой стратегией слишком велико, алгоритм будет нестабильным. Чтобы избежать вышеуказанного В такой ситуации вес выборки по важности ограничен $(1-\varepsilon,1+\varepsilon)$

Критическая сеть обновляет параметры сети ω, оптимизируя функцию потерь. Функция потерь определяется следующим образом:

$$L(\omega) = E\left[y_t - V_\omega(s_t)\right]^2 \quad (25)$$

где ω - параметры сети, обновленные с использованием метода градиентного спуска.

$$\omega \leftarrow \omega + \sigma^C \nabla_\omega L(\omega) \quad (26)$$

где σ^C — это скорость обучения сети Critic.

6. Модель динамического планирования на основе алгоритма PPO

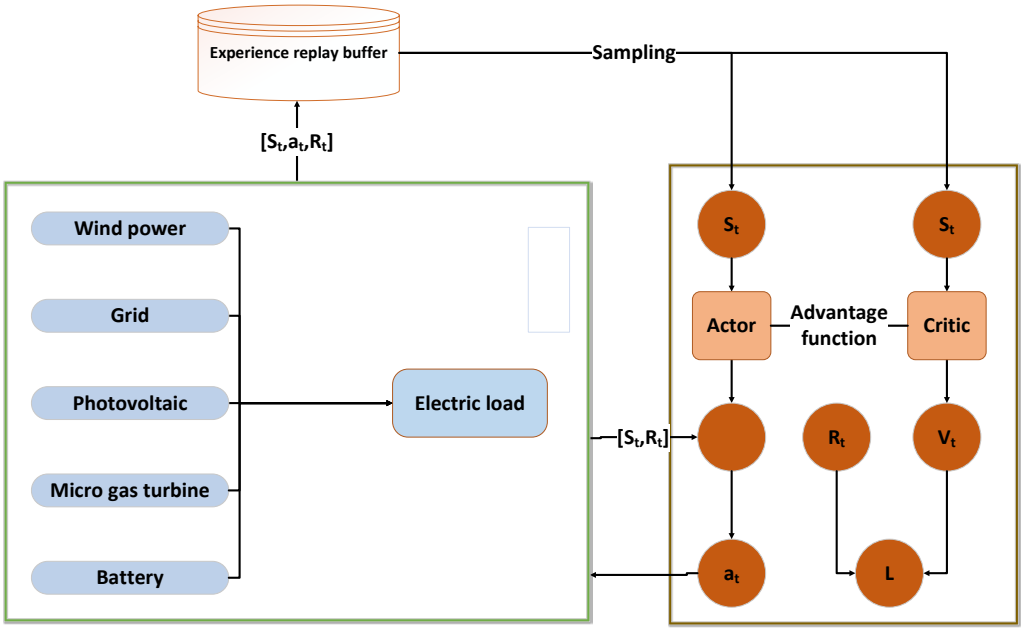


Рис. 5. динамическая экономическая схема диспетчеризации на основе алгоритма PPO

Как показано на рисунке, сеть Critic и сеть Actor случайным образом выбирают состояние s_t из пула опыта в качестве начального входного состояния. В то же время выходом сети Critic является значение V_t, а выходом сети Actor — действие a_t. Агент взаимодействует с окружающей средой в соответствии с периодом времени и выполняет действие a_t в соответствии с текущим состоянием окружающей среды s_t. Среда возвращает агенту значение вознаграждения r_t, а пул опыта использует для сохранения состояния s_t действие a_t и вознаграждение r_t каждого периода. Выборки, используемые при обновлении веса сети в агенте, берутся из случайного набора данных из пула опыта. Используйте данные обучения для завершения автономного обучения модели оптимизации VPP на основе алгоритма PPO.

7. Пример моделирования и анализ результатов. В этой статье изучаются VPP, включая распределенные источники энергии, такие как фотоэлектрические элементы, энергия ветра, накопители энергии и микрогазовые турбины. Данные получены из небольшого городка в провинции Шаньдун, Китай. Оборудование для накопления энергии имеет предел

мощности заряда и разряда 100 kw, номинальную мощность 500 kw и эффективность заряда и разряда 0,90. Параметры микрогазовой турбины подробно описаны в таблице 1.

Эксперименты в этой статье были реализованы на платформе TensorFlow. Количество скрытых слоев сети Actor и сети Critic - по 3, каждый слой содержит 200 нейронов. Обе функции активации - ReLU.Для обновления используется оптимизатор Adam. веса сети. Гиперпараметры σ_1 и σ_2: значения по умолчанию равны 0,01 и 20 соответственно, при этом эксплуатационные расходы и дисбаланс мощности используются в качестве показателей производительности алгоритма PPO.

Таблица 1

Условные обозначения

Micro Gas Turbine	a	b	c	$P_{mgt}^{\min}$	$P_{mgt}^{\max}$	$\Delta P_{mgt,i}$
Micro Gas Turbine 1'	0.0034	3	30	10	150	200
Micro Gas Turbine 1'	0.001	10	40	50	375	200
Micro Gas Turbine 1'	0.001	15	70	100	500	200

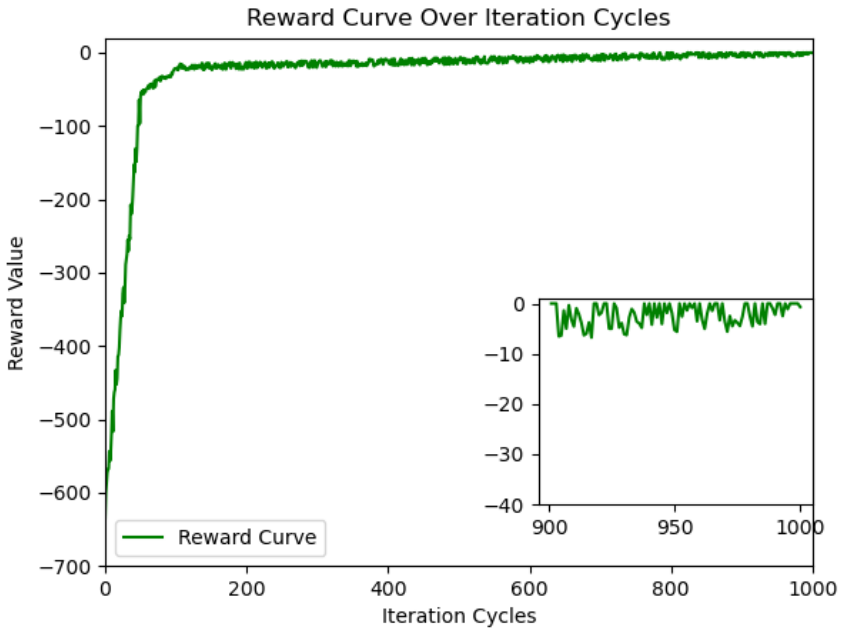


Рис. 6. Награда

На рисунке выше видно, что после 100 раундов обучения среднее значение вознаграждения быстро увеличивается, а дисбаланс сил значительно уменьшается. На начальном этапе агент ничего не знает об окружающей среде, а выбранные действия относительно случайны, что приводит к большим изменениям в значениях вознаграждения. Однако благодаря множественному взаимодействию с окружающей средой и накоплению опыта параметры глубокой нейронной сети были оптимизированы и изучены более эффективные стратегии. По мере обучения значение вознаграждения постепенно увеличивается и приближается к стабильному состоянию. Более того, в процессе обучения за счет введения штрафного

члена в определение функции вознаграждения параметры обновляются, что позволяет агенту выбирать более качественные действия, уменьшая дисбаланс сил и добиваясь снижения эксплуатационных затрат. Однако следует отметить, что алгоритм PPO не может строго выполнять балансировку мощности, что является недостатком данной статьи.

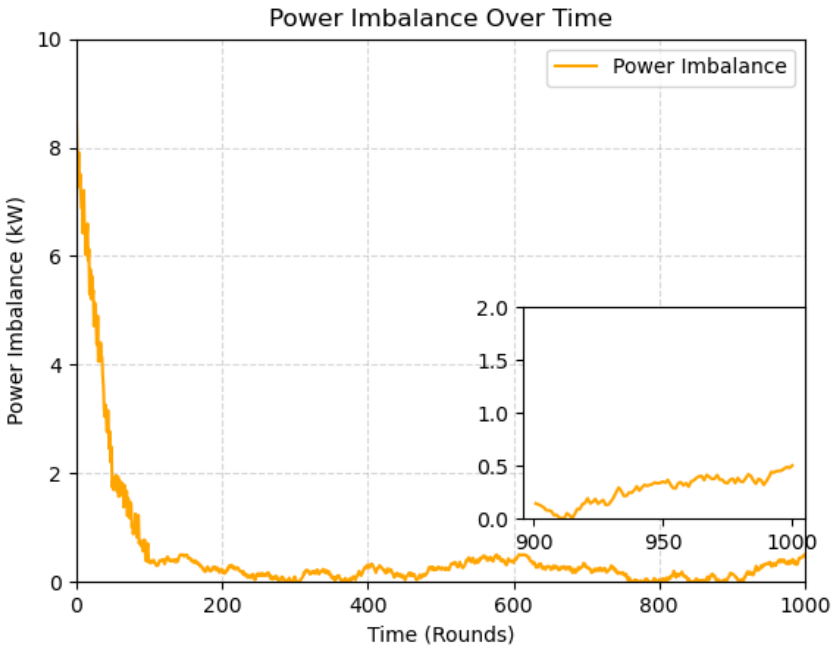


Рис. 7. Дисбаланс

Чтобы проверить эффективность алгоритма при принятии решений в режиме онлайн, оптимизация проводилась с часовыми интервалами времени, а производительность алгоритма тестировалась на данных о состоянии типичного дня.

На рисунке 8 показана нагрузка на электроэнергию, энергию ветра, фотоэлектрическую энергию и информацию о ценах на электроэнергию за 24 часа. На рисунке 9 показаны результаты работы, включая мощность зарядки и разрядки всех микрогазотурбинных установок и систем хранения энергии, а также входную/выходную мощность из сети. Кроме того, на рисунке 10 показано SOC (состояние батареи) системы хранения энергии.

На рисунке 9 видно, что в непиковые часы (00:00-04:00), когда цены на электроэнергию низкие, система хранения энергии начинает заряжаться, а SOC достигает уровня примерно 80%. В часы пик (07:00-10:00, 15:00-23:00) планируется разряжать систему хранения энергии и отправлять микрогазотурбинные установки для восполнения дефицита мощности. Стоит отметить, что микрогазовая турбина 1 используется преимущественно из-за ее более низких эксплуатационных расходов. Когда цены на электроэнергию высоки, установки микросжигания увеличивают производственную мощность для удовлетворения спроса на нагрузку с наименьшими эксплуатационными расходами. Эти результаты демонстрируют, что виртуальные электростанции могут гибко управлять диспетчер-

ской мощностью в ответ на изменения во внешней среде. Оптимизируя стратегии диспетчеризации, VPP обеспечивает экономичное и эффективное управление энергетическими ресурсами, принимая решения в режиме реального времени.

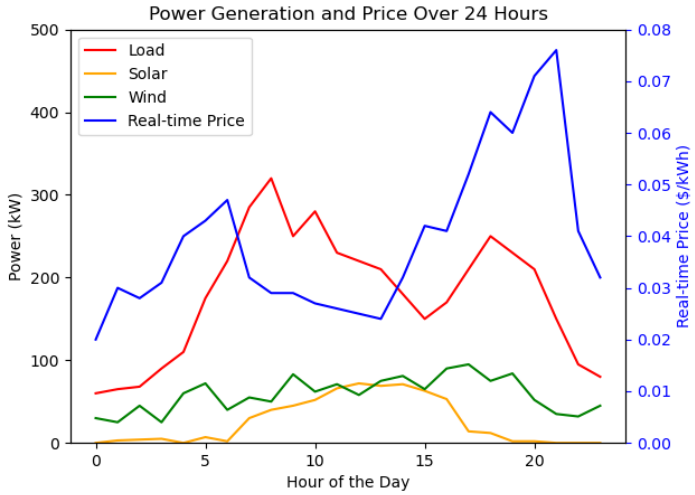


Рис. 8. Кривая данных.

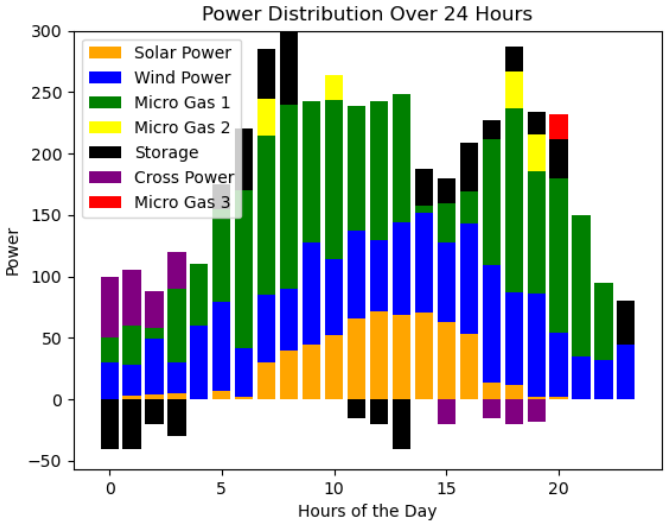


Рис. 9. Результаты планирования мощности

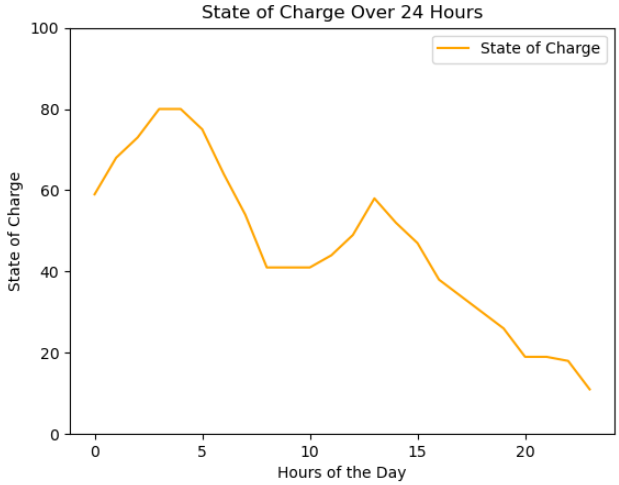


Рис. 10. Состояние заряда накопителя энергии

Заключение. В этом документе предлагается модель экономической оптимизации диспетчеризации VPP, основанная на алгоритме PPO. Эта модель сформулирована в рамках облачного сотрудничества, чтобы гарантировать, что сформулированный план диспетчеризации осуществим в режиме реального времени. В результате тестирования примеров сделаны следующие выводы.

В этой статье используется алгоритм PPO для динамического планирования и оптимизации VPP. Процесс решения не требует создания сложной физической модели. Вместо этого решение проблемы преобразуется в марковский процесс принятия решений и решается с использованием непрерывного пространства состояний и пространства действий. . Это не только позволяет избежать проблемы «проклятия размерности», вызванной дискретизацией, но также позволяет эффективно справиться с неопределенностью нагрузки источника, стабилизировать выходную мощность каждого оборудования и повысить надежность системы.

Из результатов моделирования видно, что модель, разработанная в данной статье, способна гибко управлять диспетчерским электроснабжением, реагируя на изменения внешней среды, и успешно эффективно управлять энергетическими ресурсами при принятии решений в режиме реального времени.

Регулируя значение гиперпараметра, алгоритм PPO можно заставить больше сосредоточиться на уменьшении дисбаланса мощности или оптимизации эксплуатационных затрат. Это обеспечивает определенную гибкость оптимизации и настройки VPP, позволяя алгоритму адаптироваться к различным сценариям и требованиям.

Хотя исследования в этой статье могут успешно оптимизировать экономическое управление VPP, все еще существуют такие проблемы, как невозможность строго соблюдать баланс мощности, а рассматриваемые влияющие факторы недостаточно полны, такие как средства, затраты на строительство, затраты на экологическое управление, и т. д. не рассматриваются. Будущие исследования должны быть сосредоточены на дальнейшем анализе и изучении таких факторов, как выбросы углекислого газа и загрязнение окружающей среды, для защиты окружающей среды.

Список литературы

1. Bui V., Hussain A., Kim H.M. Double deep Q -Learning-Based distributed operation of battery energy storage system considering uncertainties. IEEE Trans. Smart Grid 11, 2020. P. 457–469. DOI: 10.1109/TSG.2019.2924025.

2. Canizo M., Triguero I., Conde A., Onieva E. Multi-head CNN–RNN for multi-time series anomaly detection: an industrial case study. Neurocomputing 363. 2019. P. 246–260. DOI: 10.1016/j.neucom.2019.07.034

3. Chen G., Li J. A fully distributed ADMM-based dispatch approach for virtual power plant problems. Appl. Math. Model. 58, 2018. P. 300–312. DOI: 10.1016/j.apm.2017.06.010.

4. Etherden N., Vyatkin V., Bollen M.H.J. Virtual power plant for grid services using IEC 61850. IEEE Trans. Ind. Inf. 12, 2015. P. 437–447. DOI: 10.1109/TII.2015.2414354.

5. Gronauer S., Diepold K. Multi-agent deep reinforcement learning: a survey. Artif. Intell. Rev. 55. 2023. P. 895–943. DOI: 10.1007/s10462-021-09996-w.

6. Huang Yang Zhang, S. M. C., Gao, Y., and Yun, J. A control strategy based on deep reinforcement learning under the combined wind-solar storage system. IEEE Trans. Ind. Appl. 57. 2021. P. 6547–6558. DOI: 10.1109/TIA.2021.3105497.

7. Książek W., Abdar M., Acharya U.R., Pławiak P. A novel machine learning approach for early detection of hepatocellular carcinoma patients. Cogn. Syst. Res. 54. 2019. P. 116–127. DOI: 10.1016/j.cogsys.2018.12.001.

8. Lin L., Guan X., Peng Y., Wang N., Maharjan S., Ohtsuki T. Deep reinforcement learning for economic dispatch of virtual power plant in internet of energy // IEEE Internet Things J. 7. 2020. P. 6288–6301. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2966232.

9 Liu L., Xu D., Lam C.S. Two-layer management of HVAC-based multienergy buildings under proactive demand response of fast/slow-charging EVs. Energy Convers. Manag. 289, 117208. 2023. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117208.

10. Liu W., Zhang D., Wang X., Hou J. A decision making strategy for generating unit tripping under emergency circumstances based on deep reinforcement learning. Proc. CSEE 38. 2023. P. 109–119. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.171747.

11. Liu Y.Y., Li M., Lian H., Tang X., Liu C., Jiang C. Optimal dispatch of virtual power plant using interval and deterministic combined optimization. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 102. 2018. P. 235–244. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.04.011.

12. Lu R., Hong S.H. Incentive-based demand response for smart grid with reinforcement learning and deep neural network. Appl. Energy. 236. 2019. P. 937–949. DOI: 10. 1016/j.apenergy.2018.12.061.

13. Ma Y., Hu Z., Song Y. A Reinforcement learning based coordinated but differentiated load frequency control method with heterogeneous frequency regulation resources. IEEE Trans. Power Syst. 39. 2023. P. 2239–2250. DOI: 10.1109/TPWRS. 2023.3262543.

14. Mashhour E., Moghaddas-Tafreshi S.M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets. Part I: problem formulation. IEEE Trans. Power Syst. 26 (2). 2010. P. 949–956. DOI: 10.1109/TPWRS.2010. 2070884.

Ершов Роман Викторович, сотрудник, um-urii@mail.ru, Россия, Воркута, АО «Воркутауголь»,

Чэн Хаодун, сотрудник, chenghaodong732@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого,

Милицын Алексей Владимирович, старший преподаватель, militsyn_av@spbstu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого,

Кожубаев Юрий Нургалиевич, канд. техн. наук, доцент, y.n.kozhubaev@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого,

Милицын Артем Алексеевич, сотрудник, militsyn.aa@edu.spbstu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого

OPTIMIZATION OF ENERGY SYSTEMS AND POWER PLANTS

R.V. Ershov, Haodong Chen, A.V. Militsyn, Yu.N. Kozhubaev, A.A. Militsyn

This paper proposes a method that contains a virtual power plant economic dispatch model for wind power, photovoltaic power and energy storage. Virtual power plants can realize flexible coordination, scheduling and management of various decentralized resources, and can realize the interconnection, conversion and utilization, and joint optimization of multiple energy sources, thereby effectively improving regional comprehensive energy efficiency and reducing environmental pollution. It will gradually become a response to national development. It is one of the important means to solve the problems of high energy consumption and high pollution in the process, so it has received wide attention from the academic community.

Key words: virtual power plant, cloud edge coordination, economic dispatch.

Ershov Roman Viktorovich, employee, um-urii@mail.ru, Russia, Vorkuta, JSC Vorkutaugol,

Militsyn Alexey Vladimirovich, senior lecturer, militsyn_av@spbstu.ru, Russia, Saint Petersburg, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University,

Kozhubaev Yury Nurgalievich, candidate of technical sciences, docent, y.n.kozhubaev@gmail.com, Russia, Saint Petersburg, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University,

Cheng Haodong, employee, chenghaodong732@gmail.com, Russia, Saint Petersburg, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University,

Militsyn Artem Alekseevich, employee, militsyn.aa@edu.spbstu.ru, Russia, Saint Petersburg, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 005.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-126-127

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

М.Ю. Козьминых

В исследовании представлены результаты оценки и мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий на основе Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий». Представлен краткий обзор современных исследований по проблеме оценки безопасности предприятий на основе риск-ориентированного подхода. Обоснована возможность применения Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий» для мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий. Статистически доказана достоверность результатов оценки безопасности высокотехнологичных предприятий на основе инструментария Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий». Практическая значимость исследования обусловлена представленными результатами оценки и мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий на территории Северо-Западного федерального округа по данным контрольных (надзорных) мероприятий. По результатам мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий на территории Северо-Западного федерального округа выявлена тенденция к снижению уровня техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий.

Ключевые слова: стандарт, индикаторы риска нарушения обязательных требований, техногенная безопасность, экологическая безопасность, экономическая безопасность, риск-ориентированный подход, высокотехнологичные предприятия, мониторинг.

Обеспечение безопасности высокотехнологичных предприятий в современных условиях является одной из основ национальной безопасности [1], обеспечивает возможность бесперебойного функционирования стратегически значимых отраслей экономики России. Одним из способов обеспечения безопасности высокотехнологичных предприятий сегодня является контрольная (надзорная) деятельность уполномоченных органов [2].

Вместе с тем, при систематическом осуществлении контрольных (надзорных) мероприятий, формирования значительных данных о рисках производственных и управленческих процессах на предприятиях, соответствующие массивы данных недостаточно полно учитываются и применяются в процессе управления безопасности, и практически не применяются для оценки общей тенденции и динамики состояния безопасности предприятий. Это не позволяет осуществлять в практике в полном объеме применение риск-ориентированного подхода, и в том числе, прогнозирование возможных проявлений рисков, имеющихся в деятельности предприятия, до наступления негативных последствий в результате наступления этих рисков. Особенно актуальной проблемой является разработка методик оценки рисков безопасности предприятий, которые позволяют предупредить возникновение аварий и нештатных ситуаций, которые могут негативно повлиять на качество окружающей природной среды, жизнь и здоровье персонала предприятия [3].

Отсутствие систематической практики по оценке, обеспечению мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий, при наличии нормативной базы для применения риск-ориентированного подхода, а также значительных массивов данных о рисках производственных и управленческих процессах на предприятиях, накопленных в ходе контрольной (надзорной) деятельности, обусловлено, в том числе, отсутствие комплексных стандартов для оценки и мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий. Существующая совокупность различных методик и стандартов, применяемых для оценки рисков деятельности предприятий, характеризуется тем, что разработанные методики и стандарты, в большинстве, оценивают отдельное направление деятельности предприятий [4] (например, техногенную безопасность, финансово-хозяйственную деятельность, соблюдение требований в области охраны труда, пожарной безопасности и др.). С учетом этого, для получения комплексного представления об уровне безопасности предприятия или группы предприятий в регионе необходимо применение одновременно нескольких методов или стандартов, с последующим сопоставлением их результатов. При этом, в отдельных исследованиях показана необходимость комплексного подхода к оценке рисков в деятельности предприятия. Например, Ю.М. Биккуловой подчеркнута актуальность одновременной оценки экономических и экологических рисков в их взаимосвязи [5], Е.И. Иляковой указано на обязательность оценки экономических последствий для предприятия при наступлении рисковых событий, не связанных напрямую с финансовыми рисками [6]. При этом, существующие методы и подходы к оценке экологических рисков не учитывают их экономические последствия [7].

Внедрение в практике комплексных стандартов, которые предусматривают возможность оценки рисков в деятельности предприятия одновременно по нескольким направлениям, позволило бы решить существующую проблему.

Пример комплексного стандарта, а именно, Стандарт «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий» и порядок его применения описан в исследовании М.Ю. Козьминых [8]. Возможность применения Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий» в рамках надзорной деятельности и безопасности высокотехнологичных предприятий на основе риск-ориентированного подхода, репрезентативность отображения показателей безопасности на основе вышеуказанного Стандарта доказана в исследовании М.Ю. Козьминых, Ю.С. Клочкова [9]. Вместе с тем, на современном этапе не представлено комплексных методов и стандартов для организации мониторинга оценки рисков деятельности высокотехнологичных предприятий в динамике. Д.В. Андреев, М.Э. Макарова отмечают, что сложившаяся ситуация негативно сказывается на обеспечении техносферной безопасности в целом, и управлении рисками на отдельном предприятии в частности [10]. И. М. Маликова, К. М. Халикова, А. А. Лашманов отмечают недостаточную разработанность методов оценки рисков в сфере техносферной безопасности [11]. Существующие методы оценки индикаторов риска не во всех случаях позволяют осуществить количественный анализ рисков [12]. Это не позволяет в практике в полном объеме использовать данные, получаемые в ходе контрольной (надзорной) деятельности для организации оценки и мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий, что обусловило обоснование цели настоящего исследования.

Цель исследования – теоретическое обоснование апробация применения Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий» для организации мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий.

Задачи исследования включают:

1. Проанализировать возможность применения Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий» для мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий.

2. Провести оценку и представить результаты мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий на основе инструментария Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий».

3. Статистически оценить репрезентативность результатов оценки безопасности высокотехнологичных предприятий на основе инструментария Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий».

Методы исследования включают анализ теоретических исследований, методы анализа хозяйственной деятельности, статистические методы (корреляционный анализ).

Материалы исследования представлены результатами контрольных (надзорных) мероприятий Северо-Западного межрегионального управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, Северо-Западного межрегионального управления Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору за 2022-2024 гг., данными финансово-хозяйственных и разрешительных документов хозяйствующих субъектов – юридических лиц (контролируемых лиц) на территории Северо-Западного федерального округа, сведениями ФГИС «Единый реестр контрольных (надзорных) мероприятий».

Размер выборки – 40 предприятий, в отношении которых контрольные (надзорные) мероприятия реализовывались Северо-Западным межрегиональным управлением Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, Северо-Западным межрегиональным управлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в период 2022-2024 гг.

Результаты исследования. В современных исследованиях представлены отдельные разработки методов оценки рисков в деятельности предприятий, в том числе, по результатам контрольной (надзорной) деятельности уполномоченных органов [13]. Особенностью таких разработок является оценка рисков в отдельном направлении или виде деятельности предприятий. К.П. Карташова, А.В. Дубровский, В.Н. Москвин описали отдельные индикаторы риска нарушения обязательных требований при осуществлении государственного геологического контроля, например, признаки проведения работ по добыче полезных ископаемых на земельном участке, недостоверная информация об используемых участках недр в государственных реестрах, подчеркнута необходимость стандартизации, математического описания индикаторов рисков, для описания их в количественном выражении [14]. Аналогичные разработки имеются и для целей земельного контроля [15], контроля техногенной безопасности [16]. Имеются отдельные разработки индикаторов оценки риска производственного травматизма, состояния здоровья работников предприятий [17]. Ряд разработок посвящен оценке рисков в условиях инвестиционных проектов [18], ранжированию территорий и предприятий по степени риска [19,20], рисков природных и техногенных чрезвычайных ситуаций [21].

Д.С. Адамовым, И.Ф. Зенковой, Н.О. Щеголевой, О.С. Семеновой подчеркнута необходимость применения индикаторов риска при планирования внеплановых контрольных (надзорных) мероприятий, что требует систематической оценки рисков, их мониторинга, на основе единых, стандартных требований к такой оценке. Также авторами отмечено, что разработка индикаторов риска осуществляется на основе данных о выявляемых нарушениях обязательных требований, но в настоящее время не носит системного характера, что не позволяет отслеживать динамику рисков [22].

Таким образом, в современных исследованиях подчеркивается необходимость применения единых, стандартизированных способов оценки рисков на основе индикаторов рисков, при сравнительно небольшом числе разработанных стандартов для оценки индикаторов рисков, многие из которых не носят комплексного характера, а также не позволяют оценивать риски в количественном выражении.

Таблица 1

Шкала диапазона значений интегрального показателя техногенной, экологической или экономической безопасности (в баллах)

Диапазон значения интегрального показателя техногенной, экологической или экономической безопасности (в баллах)	Решение (либо автоматизированное решение программного обеспечения) при попадания сравниваемого значения в соответствующий диапазон
1,1 – 1,6	Направление уведомления хозяйствующему субъекту о необходимости проведения самоанализа и направления отчёта в контролирующий орган
1,7 – 2,2	Направление уведомления соответствующему контролирующему органу о необходимости проведения профилактического мероприятия
2,3 – 2,8	Направление уведомления соответствующему контролирующему органу о необходимости включения хозяйствующего субъекта в план проведения плановых контрольных (надзорных) мероприятий при одновременном проведении профилактического мероприятия
2,9 – 3,4	Направление уведомления контролирующему органу о необходимости проведении контрольного (надзорного) мероприятия по месту нахождения контролирующего органа
3,5 – 4,0	Направление уведомления контролирующему органу о необходимости инициирования внепланового контрольного (надзорного) мероприятия по месту нахождения хозяйствующего субъекта
4.1 – 4.6	Направление уведомления в органы прокуратуры о необходимости направления требования о проведении незамедлительно внепланового контрольного (надзорного) мероприятия
4,7 – 5.5	Направление уведомления в органы прокуратуры о необходимости направления требования о проведении незамедлительно внепланового контрольного (надзорного) мероприятия, информирование всех контролирующих органов о риске возникновения ЧС на предприятии

С учетом актуальности данной проблемы в исследовании ранее в исследовании выделены три группы индикаторов рисков: индикаторы техногенной безопасности предприятия; индикаторы экологической безопасности предприятия, позволяющие оценивать риск причинения в ходе деятельности предприятия вреда окружающей среде; индикаторы, позволяющие оценить экономическую безопасность предприятия, в части влияния на нее финансовых, техногенных, экологических рисков, представлена методика их оценки, с учетом весовых коэффициентов для каждого риска [8]. В вышеуказанной методике оценка каждого из 10 рисков каждой из групп производится, согласно установленным критериям, в баллах для каждой группы рисков (степень выраженности риска изменяется от 0,2 до 1). Далее производится умножение риска на весовой коэффициент, определенный экспертным способом (от 0,1 до 1). Далее полученные данные суммируются по отдельным группам рискам или в совокупности, с учетом цели анализа. Расчёт степени выраженности отдельного риска может быть представлен следующим образом:

$$Y_1 = (A_1 * 1) + (A_2 * 0{,}9) + (A_3 * 0{,}8) + (A_4 * 0{,}7) + (A_5 * 0{,}6) + \\ +(A_6 * 0{,}5) + (A_7 * 0{,}4) + (A_8 * 0{,}3) + (A_9 * 0{,}2) + (A_{10} * 0{,}1), \quad (1)$$

где Y_1 – оцениваемая группа рисков (техногенных, экологических, экономических); A_1, A_2, … A_{10} – значение каждого риска в баллах (от 0,2 до 1); 0,1 – 10 – весовой коэффициент, индивидуальный для каждого риска в отдельной группе.

Шкала диапазона значений интегрального показателя техногенной, экологической или экономической безопасности (в баллах), позволяет сформировать условия для автоматизированного принятия решений по управлению рисками, в том числе, в контрольной (надзорной) деятельности (табл. 1).

Пример оценки безопасности высокотехнологичного мероприятия на основе Стандарта применения индикаторов риска нарушения обязательных требований для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности по результатам контрольных (надзорных) мероприятий показан в таблице 2.

Таблица 2

Пример оценки безопасности высокотехнологичного мероприятия на основе Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий» по результатам контрольных (надзорных) мероприятий

Риск	Весовой коэффициент риска	Значение величины риска для предприятия	Значение величины риска для предприятия с учетом весового коэффициента
Техногенные риски (сумма рисков с учетом весовых коэффициентов – 1,84)			
Риск производственных факторов	1,0	0,20	0,2
Риск действующих опасных объектов и технологических процессов	0,9	0,40	0,36
Риск выведенных из эксплуатации опасных объектов и остановленных технологических процессов	0,8	0,20	0,16
Риск производственного травматизма	0,7	0,40	0,28
Риск износа производственного оборудования	0,6	0,20	0,12
Риск природных процессов во внешней среде	0,5	0,20	0,1
Риск наличия объектов, которые могут вызвать множественное загрязнение окружающей среды	0,4	0,60	0,24
Риск отсутствия систем контроля промышленной безопасности	0,3	0,80	0,24
Информационно-производственный риск	0,2	0,40	0,08
Риск возраста сотрудников	0,1	0,60	0,06
Экологические риски (сумма рисков с учетом весовых коэффициентов – 1,46)			
Риск соблюдения условий природопользования	1,0	0,20	0,2
Риск воздействия на компоненты природы	0,9	0,40	0,36
Риск аварийных ситуаций	0,8	0,20	0,16

Риск категории объекта негативного воздействия на окружающую среду	0,7	0,20	0,14
Риск административной ответственности по результатам контрольной (надзорной) деятельности	0,6	0,40	0,24
Риск загрязнения атмосферного воздуха	0,5	0,20	0,1
Риск отходов производства	0,4	0,20	0,08
Риск загрязнения поверхностных водных объектов	0,3	0,40	0,12
Риск, определяемый частотой контроля	0,2	0,20	0,04
Информационный риск (на основе государственного реестра объектов НВОС)	0,1	0,20	0,02
Экономические риски (сумма рисков с учетом весовых коэффициентов – 1,62)			
Риск финансовой устойчивости	1,0	0,40	0,4
Инвестиционный риск	0,9	0,20	0,18
Риск недостатка средств на развитие и модернизацию производств	0,8	0,20	0,16
Риск недостатка резервов на ликвидацию аварийных и иных чрезвычайных ситуаций	0,7	0,40	0,28
Риск низкого объема прибыли	0,6	0,20	0,12
Риск технологического суверенитета	0,5	0,20	0,1
Риск налогового режима	0,4	0,40	0,16
Риск добросовестного поведения контролирующего лица	0,3	0,20	0,06
Риск гражданско-правовой ответственности	0,2	0,60	0,12
Репутационный риск	0,1	0,40	0,04
Общее значение суммы по трем группам рисков в баллах – 4,92			

С учетом рассчитанных сумм значений рисков по каждой группе, предприятие характеризуется низкой степенью риска. Значение суммы техногенных рисков свидетельствует о необходимости направления уведомления соответствующему контролирующему органу о необходимости проведения профилактического мероприятия.

Аналогичным образом по данным, полученным в ходе контрольных (надзорных) мероприятий, значение рисков может быть рассчитано по совокупности предприятий, в динамике – рисунок 1.

При представлении данных выраженности техногенных, экологических, экономических рисков для случайной выборочной совокупности предприятий в динамике можно сделать общий вывод о тенденции снижения безопасности высокотехнологичных предприятий (повышении суммы значений рисков) за исследуемый период 2022-2024 гг.

Динамика безопасности высокотехнологичных предприятий по общей выборке может быть отображена в виде среднего значения величины риска по всем исследуемым предприятиям. В ходе исследования выявлено также повышение величины риска в последние три года, что свидетельствует о некотором снижении безопасности исследуемых высокотехнологичных предприятий – рисунок 2.

Для целей государственного контроля, самоанализа безопасности предприятий более репрезентативным является расчет и представление в динамике рисков по группам – рисунок 3.

Таким образом, по результатам контрольной (надзорной) деятельности в отношении высокотехнологичных предприятий на основе индикаторов риска, выявлена общая тенденция к повышению выраженности техногенных, экологических, экономических рисков, что свидетельствует,

соответственно, о снижении уровня техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий. Динамика результатов контрольной (надзорной) деятельности в отношении высокотехнологичных предприятий может быть представлена в абсолютных значениях по ряду параметров. Пример такой оценки показан на рисунке 4.

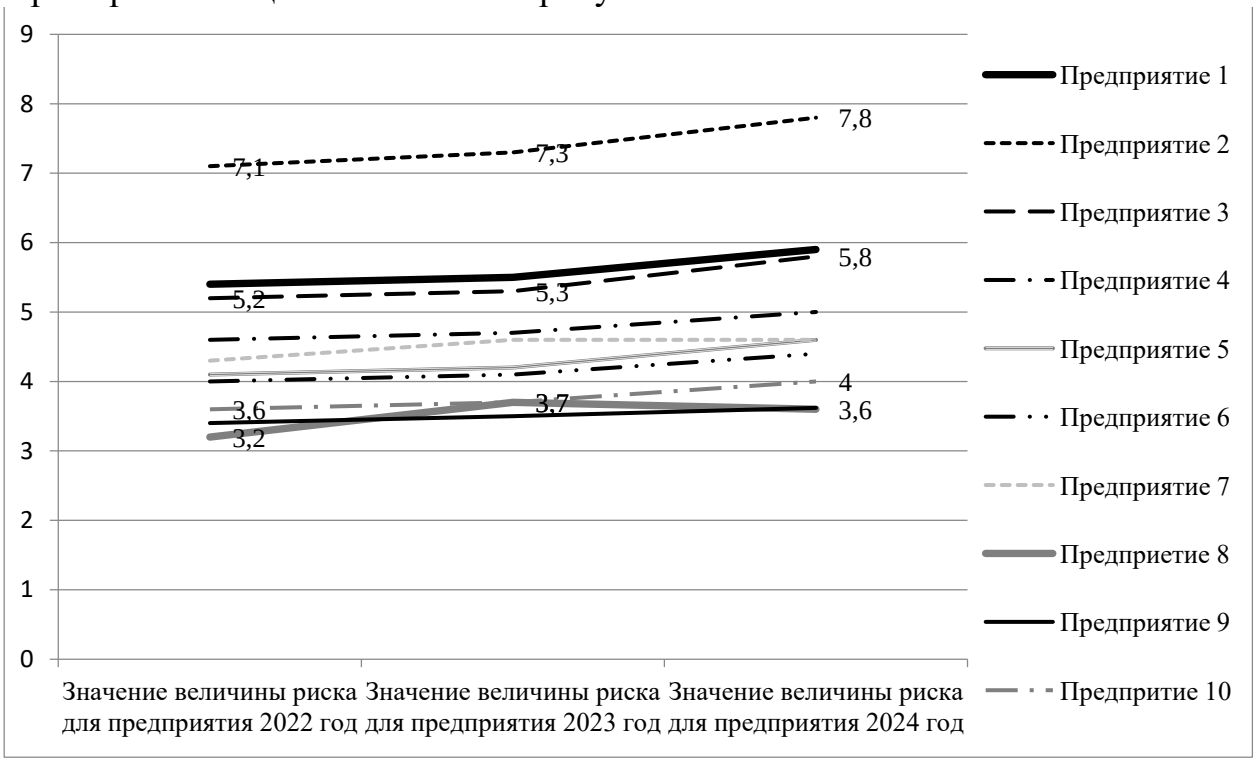


Рис. 1. Динамика выраженности техногенных, экологических, экономических рисков для случайной выборочной совокупности предприятий за 2022-2024 год

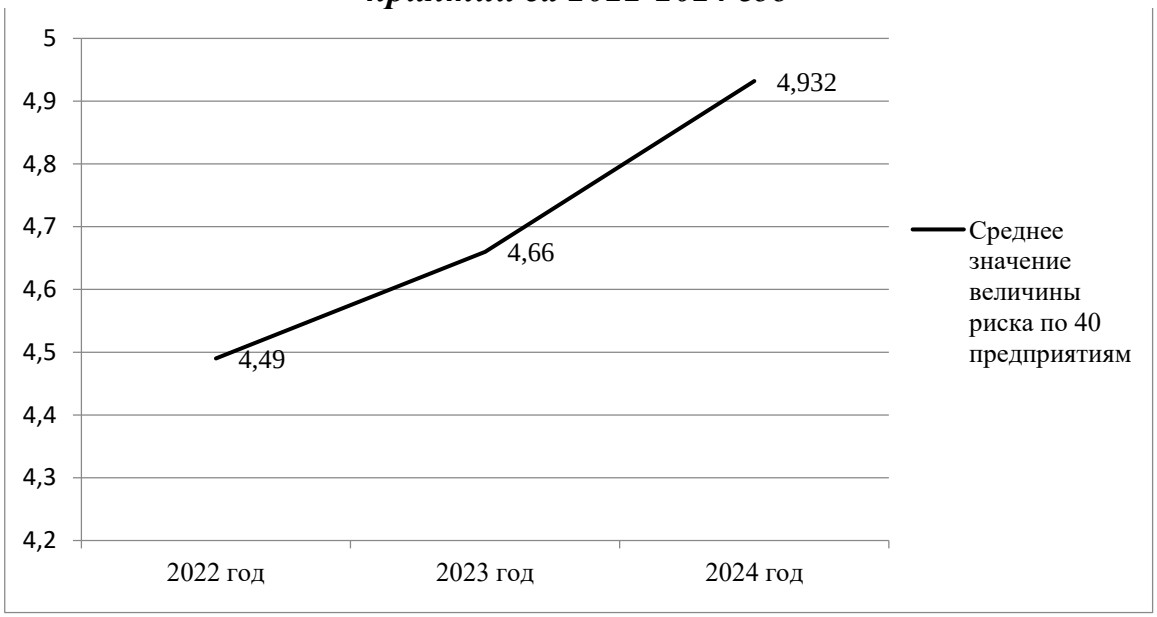


Рис. 2 Динамика выраженности значения рисков (среднее значение в баллах) для 40 предприятий за 2022-2024 год

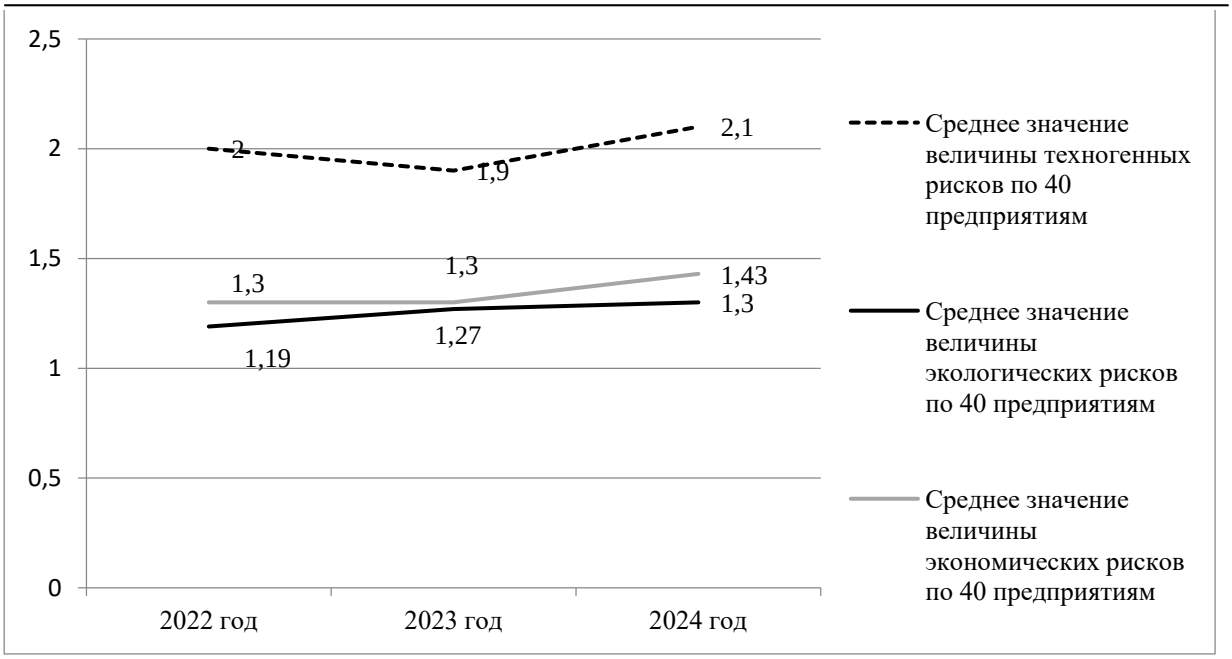


Рис. 3 Динамика выраженности техногенных, экологических, экономических рисков (среднее значение в баллах) для 40 предприятий за 2022-2024 год

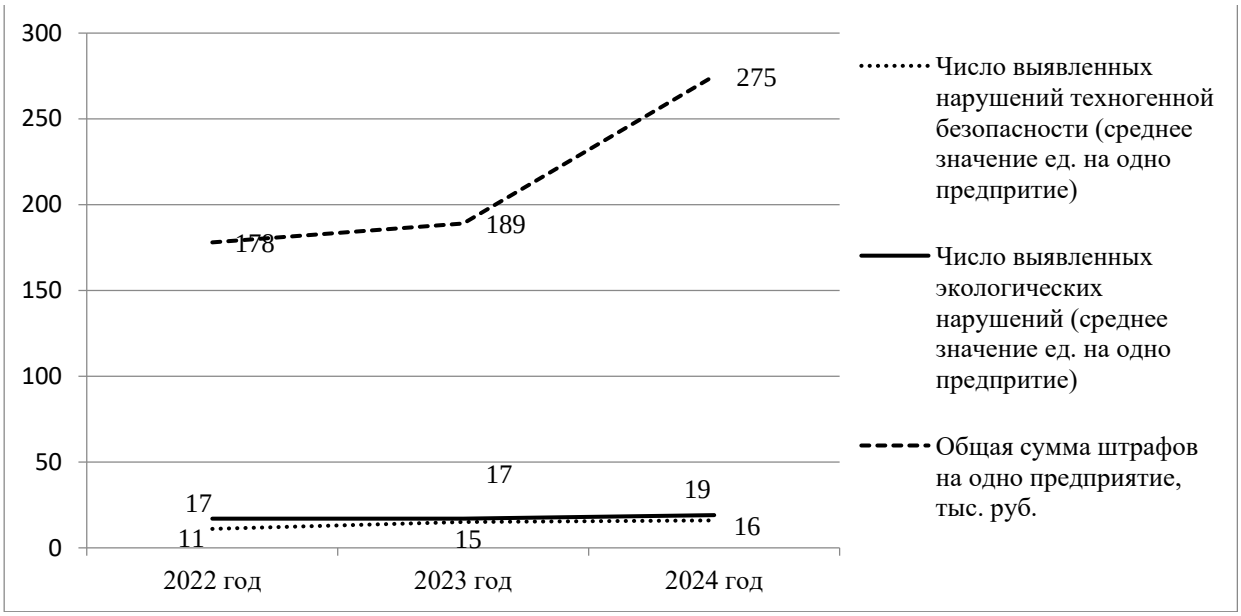


Рис. 4. Динамика выраженности рисков по результатам контрольной (надзорной) деятельности в абсолютных значениях за 2022-2024 гг.

Как можно отметить по рисунку 4, при оценке результатов контрольной (надзорной) деятельности в абсолютных величинах по ряду показателей, также можно выявить негативную тенденцию изменения уровня безопасности предприятий. Вместе с тем, такой подход к оценке не позволяет провести комплексную оценку безопасности и представить возможные меры по снижению рисков безопасности предприятий.

Для доказательства статистического сходства результатов диагностики на основе абсолютных значений (число выявленных нарушений, сумма штрафов) и предложенного ранее Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий» проведен корреляционный анализ полученных данных с привлечением коэффициента корреляции Спирмана. Массивы данных по результатам оценки по абсолютным показателям (число выявленных нарушений, сумма штрафов) и данных по результатам оценки на основе Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий» сопоставлены при помощи функции КОРРЕЛ в MS EXCEL, с расчетом коэффициента Спирмена по формуле (2).

$$Correl(X,Y) = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (2)$$

Для исследуемой выборки объемом 40 коэффициент Спирмена оказался равен 0,54, что по шкале Чеддока соответствует «заметной» силе корреляционной связи. Статистическая значимость коэффициента корреляции определена с помощью t-критерия по формуле (3)

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0{,}54\sqrt{48-2}}{\sqrt{1-0{,}54^2}} = 4{,}35. \quad (3)$$

При уровне значимости $p<0{,}05$ и числе степеней свободы 46 $t_{крит}=2{,}013$. Рассчитанное значение t больше $t_{крит}$, следовательно корреляционную связь можно считать статистически доказанной.

Это позволяет использовать Стандарт «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий» для оценки и мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий посредством оценки выраженности различных групп рисков – техногенных, экологических и экономических.

Заключение. На основе полученных результатов исследования сделаны следующие выводы.

1. Выявлена тенденция к снижению безопасности высокотехнологичных предприятий на территории Северо-Западного федерального округа в период 2022-2024 гг., по результатам контрольной (надзорной) деятельности на основе Стандарта «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий».

2. Описан алгоритм оценки и организации мониторинга техногенной, экологической, экономической безопасности высокотехнологичных предприятий по данным, получаемым в ходе контрольной (надзорной) деятельности.

3. Статистически доказана возможность применения инструментария Стандарт «Индикаторы риска нарушения обязательных требований. Порядок применения для оценки техногенной, экологической, экономической безопасности предприятий» для оценки и мониторинга техногенной,

экологической, экономической безопасности высокотехнологичных предприятий посредством оценки выраженности различных групп рисков – техногенных, экологических и экономических.

Благодарность: Автор выражает благодарность за консультативную помощь, представленные аналитические данные о результатах контрольных (надзорных) мероприятий Руководителю Северо-Западного управления Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, К.А. Давыдову.

Список литературы

1. Указ Президента РФ от 02.07.2021 № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации».

2. Кондрашова Н.Г., Галуза Т.Д. Управление рисками экономической безопасности на уровне предприятия // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. №12-1. С. 169-172.

3. Патокина Ю.В. Методы оценки рисков в области техносферной безопасности // Мировая наука. 2023. №2 (71). С. 123-126.

4. Аленичев В.М. Идентификация техногенных рисков индустриального характера на горных предприятиях // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. №3. С. 90-100.

5. Биккулова Ю. М. Формирование системы индикаторов для оценки состояния экологической составляющей экономической безопасности предприятия // E-Scio. 2019. №4 (31). С. 278-285.

6. Илякова И. Е. Оценка экологических последствий хозяйственной деятельности промышленного предприятия в контексте концепции экономической безопасности // Контентус. 2019. №9 (86). С. 89-98.

7. Матвеева А.А. Управление рисками для обеспечения экологической безопасности на предприятиях // Природные системы и ресурсы. 2018. №3. С. 51-58.

8. Козьминых М.Ю. Стандартизация надзорной деятельности на основе риск-ориентированного подхода в отношении высокотехнологичных предприятий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2024 т. 26, № 4, С. 5-25. DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4-5-25

9. Kozminykh M.Yu. Klochkov Y.S. Supervision and safety quality improvement of high-tech enterprises by a risk-based approach // International journal for Quality Research V. 20. N 1. 10.24874/IJQR20.01-02

10. Андреев Д.В., Макарова М.Э. Техногенная безопасность как одна из приоритетных задач государства // StudNet. 2020. №12. С. 1313-1319

11. Маликова И.М., Халикова К.М., Лашманов А.А. Методы оценки рисков в области техносферной безопасности // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. №5-4 (92). С. 161-164.

12. Патокина Ю. В. Методы оценки рисков в области техносферной безопасности // Мировая наука. 2023. №2 (71). С. 123-126.

13. Колесникова Л.А., Новиков А.С. Анализ существующих методик оценки экологических рисков промышленных предприятий // Уголь. 2019. №4 (1117). С. 97-100.

14. Карташова К. П., Дубровский А. В., Москвин В. Н. О применении индикаторов риска нарушения обязательных требований при осуществлении федерального государственного геологического контроля // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 4. С. 145–155.

15. Карташова К.П., Дубровский А.В., Москвин В.Н., Татаренко В.И., Пластинин Л.А. Разработка индикаторов риска нарушения обязательных требований при осуществлении государственного земельного контроля Федеральной службой по надзору в сфере природопользования // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2024. №5. С. 148-157

16. Москвичев В.В., Постникова У.С., Тасейко О.В. Управление техногенной безопасностью на основе риск-ориентированного подхода // Проблемы управления. 2022. №3. С. 16-28.

17. Бухтияров И.В., Кузьмина Л.П., Головкова Н.П., Чеботарёв А.Г., Лескина Л.М., Хелковский-сергеев Н.А., Котова Н.И. Обоснование платформы стандартов на основе оценки риска нарушения здоровья работников предприятий ведущих отраслей экономики // Мед. труда и пром. экол., 2021. №3. С. 155-160.

18. Богомолова Е.А., Возгомент Н.В. Организация риск-менеджмента при реализации инвестиционно- инновационных проектов // Вестник ГУУ. 2019. №3. С. 127-136.

19. Клочков Ю.С. Учет неопределенности при проведении процедуры FMEA-анализа / Ю.С. Клочков, Г.А. Фокин, О.В. Сыровацский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23, № 6(104). С. 26-32. DOI 10.37313/1990-5378-2021-23-6-26-32. EDN XULUKO.

20. Иванова У.С., Москвичев В.В., Тасейко О.В. Ранжирование территорий красноярского краяс использованием риск-ориентированного подхода // Проблемы анализа риска. 2019. №4. С. 48-63.

21. Ничепорчук В.В., Пенькова Т. Г. Комплексный анализ факторов территориальных рисковдля оценивания и управления природно-техногенной безопасностью // Проблемы анализа риска. 2019. №4. С. 64-74.

22. Адамов Д.С., Зенкова И.Ф., Щеголева Н.О., Семенова О.С. Проведение внеплановых проверок при выявлении индикаторов риска нарушения обязательных требований // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2023. №4 (18). С. 64-67.

Козьминых Михаил Юрьевич, руководитель, mk@alfa.su, Россия, Санкт-Петербург, Северо-Западное межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования

IMPROVING SECURITY MONITORING OF HIGH-TECH ENTERPRISES BASED ON THE STANDARD FOR THE APPLICATION OF RISK INDICATORS FOR VIOLATION OF MANDATORY REQUIREMENTS

M.Yu. Kozminykh

The study presents the results of assessment and monitoring of the safety of high-tech enterprises based on the Standard «Indicators of the risk of violation of mandatory requirements. Procedure for Application for Assessment of Technogenic, Ecological and Economic Safety of Enterprises». A brief overview of current studies on the problem of assessing the safety of enterprises based on a risk-based approach is presented. The possibility of applying the Standard «Indicators of Risk of Violation of Mandatory Requirements. Procedure for use to assess technogenic, environmental, economic safety of enterprises» for monitoring the safety of high-tech enterprises. The reliability of the results of the safety assessment of high-tech enterprises based on the tools of the Standard «Indicators of the risk of violation of mandatory requirements. Procedure for Application for Assessment of Technogenic, Ecological and Economic Safety of Enterprises». The practical significance of the study is due to the presented results of assessing and monitoring the safety of high-tech enterprises in the North-West Federal District based on the data of control (supervisory) measures. According to the results of monitoring the safety of high-tech enterprises in the North-West Federal District, a tendency towards a decrease in the level of technogenic, environmental, and economic safety of enterprises was revealed.

Key words: standard, indicators of risk of violation of mandatory requirements, technogenic safety, environmental safety, economic safety, risk-oriented approach, high-tech enterprises, monitoring.

Kozminykh Mikhail Yurievich, head, mk@alfa.su, Russia, Saint Petersburg, North-Western Interregional Department of the Federal Service for Supervision of Natural Resources

УДК 338.245 (470)
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-138-139

СОЗДАНИЕ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПОЛИГОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин

Рассматривается имеющийся алгоритм действия при проведении ремонта и обслуживании полигонного оборудования. На его основе строится сетевая модель, позволяющая выявлять слабые места, требующие оптимизации. Анализируются условия, которые ведут к увеличению продолжительности производственного цикла.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, полигонное оборудование, систематизация процесса, ритмичность производственного цикла, сетевая модель, моделирование производственного процесса.

Моделирование, основанное на сетевой модели, применяется для анализа динамических дискретных систем и позволяет не только фиксировать процесс, но и выявлять «узкие» места, требующие оптимизации. Сетевая модель (СМ) включает в себя такие элементы, как операция, событие и путь.

Операция описывает действие, которое может быть материальным и требовать использование ресурсов, или логическим, зависящим от взаимосвязи событий. В графическом виде операция представляется стрелкой, связывающей два события. Она обозначается парой чисел, заключенных в скобки (i, j): первое число "i" указывает на событие, откуда операция начинается, а второе "j" - на событие, к которому она приводит. Операция не может начинаться до возникновения события, из которого она проистекает. Каждая операция имеет определённую продолжительность t(i,j). Например, запись t(1,4) = 3 означает, что операция начинается из события 1, заканчивается в событии 4 и имеет продолжительность 3 временных единицы. К операциям также относятся процессы, которые не требуют использования ресурсов или времени, устанавливающие логическую зависимость между событиями и показывающие, что одно событие зависит от другого. Такие операции называются фиктивными.

Событиями называются результаты выполнения одной или нескольких операций. Они не имеют протяженности во времени. Событие наступает в тот момент, когда оканчивается последняя из операций, входящих в него. Событие обозначается одним числом и при графическом представлении СМ изображается прямоугольником, внутри которого проставляется его порядковый номер (i = 1,2,...,N). В СМ имеется исходное событие (с номером 1), из которого операции только исходят, и завершающее событие (с номером N), в которое операции только входят. Для любой операции (i, j) событие “i” называется начальным, а событие “j” – конечным.

Путь (полный) - это непрерывная цепочка следующих друг за другом операций, соединяющих начальное и конечное события сети. Продолжительность пути определяется суммой продолжительностей составляющих его операций. Путь, имеющий максимальную длину, называют критическим и обозначают Lкр, а его продолжительность tкр. Операции, принадлежащие критическому пути, называются критическими. Их несвоевременное выполнение ведет к увеличению срока окончания проекта, т.е. к срыву всего комплекса работ.

При построении сетевой модели необходимо соблюдать следующие правила:

1. События должны быть корректно пронумерованы, то есть для каждой операции (i, j) должно выполняться условие i < j;

2. Не должно быть тупиковых событий (за исключением завершающего), то есть тех, которые не имеют хотя бы одной последующей операции;

3. Необходимо, чтобы все события (кроме начального) имели хотя бы одну предшествующую операцию;

4. Циклы, то есть замкнутые маршруты, которые соединяют событие с самим собой, должны отсутствовать;

5. Ни одна пара операций не может определяться идентичными начальным и конечным событиями. Возможность неоднозначного определения операции через события возникает, когда существуют две или большее число операций допустимо выполнять одновременно.

При моделировании ТОиР сетевая модель S будет состоять из четырех элементов $S=(P,T,Vr,L)$, где Р - конечное множество событий сетевой модели $P=\{P_1,...,P_{22}\}$, Т – конечное множество операций сетевой модели $T=\{t_1,...,t_{21}\}$ с временем выполнения операций $Vr=\{Vr_1,...,Vr_{21}\}$, L – путь полный, содержащий набор событий от первого до последнего, Lкр - критический путь с максимальной длиной по продолжительности без циклов.

Исходная таблица для формирования сетевой модели ТОиР полигонного оборудования с описанием событий, операций и непосредственно предшествующих операций представлена в таблице 1.

Таблица 1

Операции и события сетевой модели ТОиР

№	Операции и события	Содержание	Непосредственно предшествующие операции
1	P1	План-график работ, который был представлен для согласования	
2	t1	Анализ согласованного план-графика	_
3	P2	Протокол несоответствий	
4	t2	Разрешение разногласий и утверждение план-графика работ	T1
5	P3	Утвержденный план-график работ	
6	T3	Отправка запроса о готовности воинской части для выполнения работ в установленные сроки	T2
7	P4	Ответ воинской части о ее готовности к выполнению работ	
8	T4	Подготовка к производству (материально-техническая, метрологическая, финансовая организация, квалификация специалистов и т.д.)	T3
9	T5	Согласование новых сроков выполнения работ с воинской частью в случае её неподготовленности и отправка запроса на внесение изменений заказчику.	T3
10	P5	Документы, необходимые для направления выездной бригады (командировочные удостоверения, техническое задание и т.п.).	
11	P6	Новые сроки выполнения работ, согласованные с заказчиком.	
12	T6	Прием изделия полигонного оборудования для сервисного обслуживания в воинской части.	T4
13	P7	Ведомость приемки на ремонт.	
14	T7	Оформление акта приема-передачи изделия ПО на сервисное обслуживание.	T6
15	T8	Оформление обоснованного отказа в приемке изделия на ремонт, если оно не соответствует условиям контракта.	T6
16	P8	Акт приема-передачи изделия ПО на сервисное обслуживание.	
17	P9	Обоснованный отказ в приемке изделия на сервисное обслуживание.	
18	T9	Проведение технической диагностики изделия ПО.	T7
19	T10	Оформление запроса на исключение изделия ПО из план-графика проведения работ.	T8
20	P10	Подтверждение исключения изделия ПО из план-графика выполнения работ.	
21	P11	Дефектационная ведомость на диагностируемое изделие ПО.	
22	T11	Ремонт изделия на полигоне (при возможности его проведения).	T9
23	T12	Оформление рекомендаций на ремонт изделия ПО в заводских условиях (если ремонт на полигоне невозможен).	T9
24	P12	Список неисправностей изделия ПО	
25	P13	Подготовка рекомендаций по проведению заводского ремонта изделия программного обеспечения	
26	T13	Оформление акта восстановления изделия программного обеспечения.	T11
27	T14	Составление акта о приостановке работ из-за необходимости закупки комплектующих для ремонта или заводского ремонта отдельных элементов.	T11
28	P14	Утвержденный начальником полигона акт восстановления изделия программного обеспечения.	

29	P15	Акт о приостановлении работ по причине необходимости закупки комплектующих для ремонта или заводского ремонта составных частей.	
30	T15	Проведение тестового технического обслуживания исправного изделия программного обеспечения.	T14
31	T16	Оформление акта о приостановлении работ из-за необходимости закупки материалов для технического обслуживания.	T13
32	P16	Утвержденный начальником полигона акт о проведении сервисного обслуживания изделия программного обеспечения.	
33	P17	Акт о приостановлении работ из-за необходимости закупки материалов для технического обслуживания.	
34	T17	Утверждение акта приема выполненных работ и заполнение анкеты для оценки удовлетворенности клиента.	T15
35	P18	Утвержденные начальником полигона акт приема выполненных работ и анкета удовлетворенности клиента.	
36	T18	Оформление дела по ремонту изделия программного обеспечения и расчетно-калькуляционных материалов (РКМ).	T17
37	P19	Оформление документов на ремонт в соответствии с требованиями контракта для РКМ.	
38	T19	Передача дела по ремонту и РКМ в военное подразделение (ВП).	T18
39	P20	Утвержденное ВП Министерства обороны Российской Федерации удостоверение и заключение о выполненных работах.	
40	T20	Оформление платежных документов за выполненные работы.	T19
41	P21	Подготовленные платежные документы за выполненные работы.	
42	T21	Сдача документов заказчику для оплаты.	T20
43	P22	Принятые заказчиком документы за выполненные работы.	

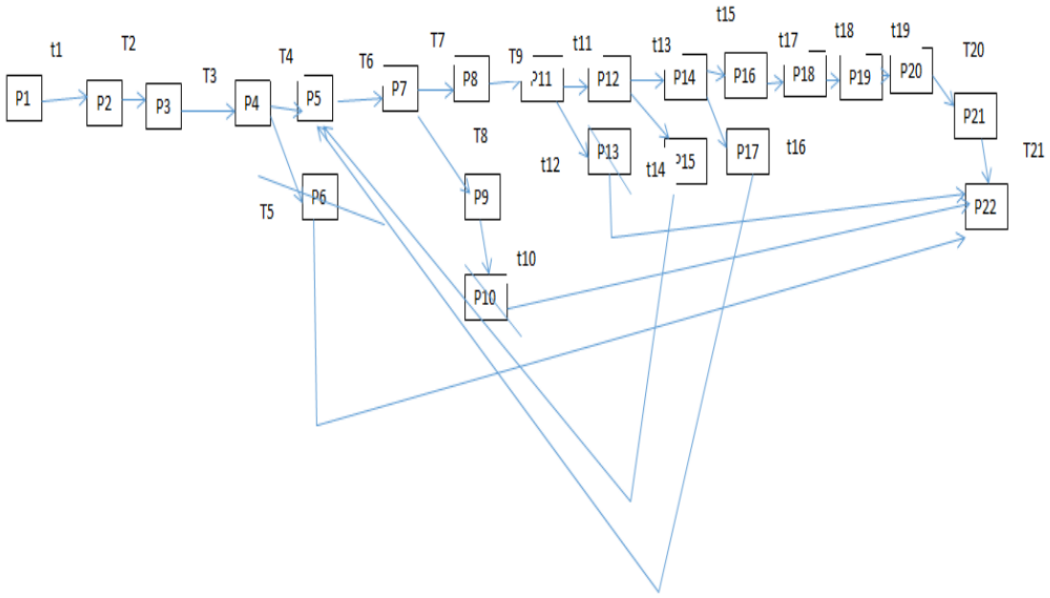


Рис. 1. Сетевая модель ТОиР

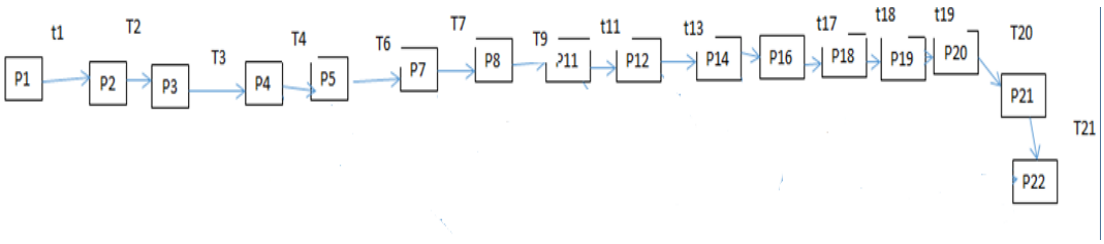


Рис. 2. Оптимизированная сетевая модель ТОиР с критическим путем

Самым очевидным методом создания сетевой модели является представление её в форме направленного графа, включающего набор операций

и событий, при этом не должно быть циклов, указывающих на «узкие» места в производственном процессе. Исходя из таблицы 1, можно создать сетевую модель в виде направленного графа, демонстрирующего выполнение производственного процесса по техническому обслуживанию иремонтуполигонногооборудования(рис.1).

Моделирование исследуемого производственного процесса в сетевом виде дает возможность визуально представить все его этапы, выявить проблемы в их работе и разработать решения для их устранения. Построенная сетевая модель технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования демонстрирует, что при определенных событиях, возникающих в ходе выполнения тех или иных операций, происходит возврат к ранее выполненным этапам либо же сеть переходит к выполнению возвратного цикла, а также возможен переход к конечному этапу. Такие условия ведут к увеличению продолжительности производственного цикла и снижению ритмичности работы процесса. В результате этого ухудшается качество выполняемых работ, что проявляется в снижении уровня удовлетворенности клиентов и создает риск нарушений сроков выполнения контракта.

Список литературы

1. Голубева Н.В. Математическое моделирование систем и процессов: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2013. 192 с.

2. Кузьмин В.В. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения. М.: Высшая школа, 2008. 279 с.

3. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов. М.: КД Либроком, 2018. 416 с.

4. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Уч. М.: Инфра-М, 2017. 160 с.

5. Панюков Д.И., Козловский В.Н., Слистина 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

CREATION OF A NETWORK MODEL OF THE PROCESS OF MAINTENANCE AND REPAIR OF LANDFILL EQUIPMENT

A.E. Lukyanov, O.V. Pantyukhin

The existing algorithm of action during the repair and maintenance of landfill equipment is considered. Based on it, a network model is being built to identify weaknesses that require optimization. The conditions that lead to an increase in the duration of the production cycle are analyzed.

Key words: maintenance and repair, landfill equipment, systematization of the process, rhythm of the production cycle, network model, modeling of the production process.

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 004.942
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-143-144

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГРАММНЫМ ПРОДУКТАМ

И.А. Бакулин, Л.М. Червяков, Н.А. Бычкова

В статье представлена разработанная информационно-аналитическая система моделирования технических требований к программным продуктам. Система предназначена для сокращения времени проектирования ПО на основе разработки ИАС моделирования технических требований. Проанализирована предметная область моделирования требований, современные пути автоматизации процесса моделирования требований и существующие сервисы для моделирования требований, а также проведен обзор методологий моделирования требований. Спроектирована система моделирования технических требований: определены требования к системе, ключевые бизнес-процессы и уровни безопасности информационно-аналитической системы, спроектирована структура базы данных, определена ролевая модель и интеграционное взаимодействие. Представлена реализация отдельных составляющих информационно-аналитической системы: контроллеры, бизнес-логика, даталогическая модель, экраны интерфейса информационно-аналитической системы, а также технологии для реализации обоснован их выбор. Была разработана методика развертывания и эксплуатации информационно-аналитической системы.

Ключевые слова: моделирование требований, бизнес-процессы, технические требования, информационно-аналитическая система, проектирование программного обеспечения.

Согласно современным исследованиям 56% дефектов программного обеспечения (далее ПО) возникает на этапе определения требований, при этом исправление ошибок на этапе определения требований имеет самую низкую относительную стоимость. Ускорение анализа требований ПО становится ключевым фактором для улучшения конкурентоспособности продуктов и сокращения времени их разработки. Повышение точности анализа требований играет ключевую роль в предотвращении ошибок и улучшении взаимодействия между аналитиками и разработчиками ПО. С учетом современных стандартов эффективности и скорости, автоматизация процесса анализа становится неотъемлемой частью разработки, обеспечивая быстрое принятие решений и минимизацию времени на выявление ошибок.

Разработка информационно-аналитической системы моделирования технических требований (далее АИС МТТ) направлена на сокращение времени проектирования и минимизацию рассогласованностей в реализации требований к программному продукту. Исследование включает задачи анализа существующих технологий автоматизации работы с требованиями, в том числе анализ процедур управления требований к ПО и обзор методологий моделирования требований; задачи проектирования информационной системы моделирования технических требований, в том числе определение требований к ПО, разработку структур баз данных, определение ролевой модели, обеспечение безопасности данных и интеграция с существующими инструментами, задачи разработки прототипа информационной системы моделирования технических требований, в том числе выбор технологий для разработки, разработку даталогической модели, бизнес-логики, контроллеров, интерфейса и методики развертывания и эксплуатации программного продукта.

Программное обеспечение в общем виде — это комплекс программ, взаимодействующих между собой и обрабатывающих информацию, которое создаётся для решения различных проблем, автоматизации бизнес-процессов в различных сферах, будь то производство электродвигателей, бухгалтерский учёт или ведение распорядка дня. Одним из ведущих лиц в разработке ПО является аналитик, главными задачами которого становятся мониторинг и управление изменениями в разных аспектных областях создания программного обеспечения, в том числе управление системными, организационными, пользовательскими, техническими и технологическими изменениями. По ролям в проектных командах разработки ПО часто выделяют бизнес-аналитика и системного аналитика, которые иногда могут быть функционально объединены в рамках проекта в одну должностную позицию. В рамках своих должностных обязанностей сотрудником при этом выполняются следующие задачи бизнес-анализа и системного анализа: анализ предметной области и текущих систем заказчика, вявление, сбор, описание и согласование требований с заказчиком; описание системной реализации ПО, в том числе описание требований, данных, бизнес-процессов, пользовательских интерфейсов; иинтеграционные взаимодействия, кконсультации команды по требованиям, сдача проекта заказчику, в том числе демонстрации системы и документациии; поддержка выхода в промышленную эксплуатацию, в том числе обучение, разбор инцидентов.

Исходя из решаемых задач аналитика, основным предметом его работы является система требованиййй к программному обеспечению, как комплекс взаимосвязанных многоаспектных требований. Согласно российскому стандарту ГОСТ Р 59194-2020, требование – это требуемая (ожидаемая) количественная или качественная характеристика, или свойство объекта, а также связанные ограничения и условия.[1]

Карл Вигерс в своей книге «Разработка требований к программному обеспечению» описывает различные уровни требований: ввысокоуровневые цели организации; задачи и цели пользователей; необходимое поведение системы (рис.1) [2].

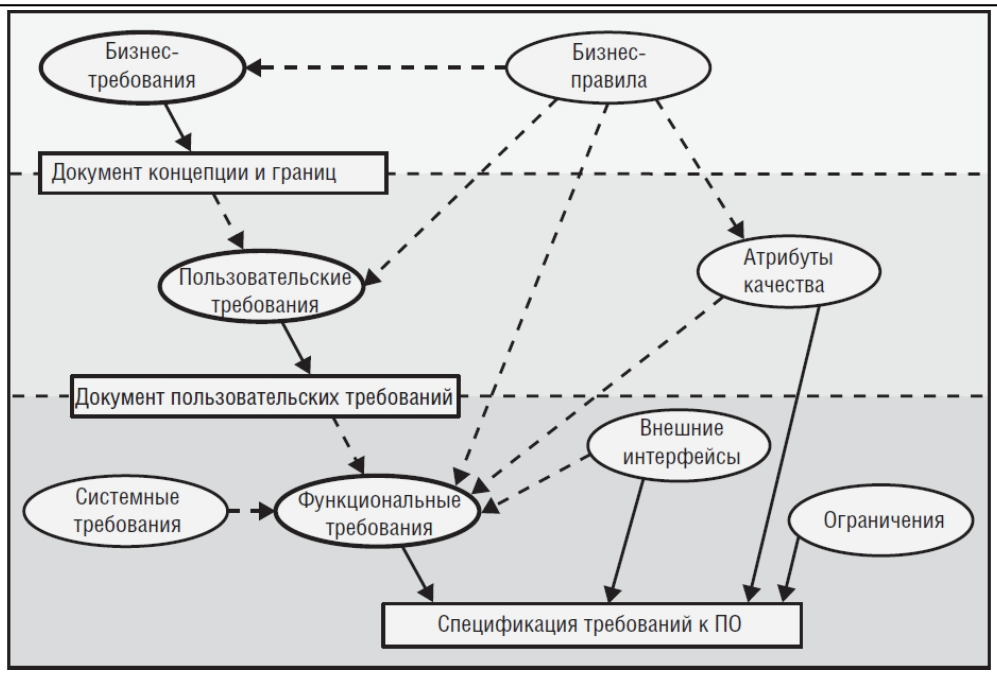


Рис. 1. Требования по К.Вигерсу

В современной практике разработки ПО используются и другие классификации требований. BABOK (сокращение расшифровывается как A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge – это письменное руководство, сбор знаний бизнес-анализа, который отражает текущие практики бизнес-анализа. В документе описаны ключевые концепции бизнес-анализа, методы сбора требований и жизненный цикл управления ими, а также навыки бизнес-аналитика.

В руководстве предлагается следующая классификация требований:

– Бизнес-требования – определяют цели, задачи и результаты, которые обосновывают необходимость изменений.

– Требования заинтересованных сторон – отражают потребности клиентов и других заинтересованных лиц, необходимые для выполнения бизнес-требований. Они играют роль связующего звена между бизнес-требованиями и требованиями к решению.

– Требования к решению – описывают возможности и характеристики, которые необходимы для удовлетворения потребностей клиентов. Они подразделяются на: функциональные требования – определяют поведение системы и управление информацией; нефункциональные требования – устанавливают условия эффективности и качества обслуживания.

– Переходные требования – описывают возможности и условия, необходимые для перехода от текущего состояния к желаемому будущему. Они носят временный характер и утрачивают актуальность после завершения изменений. Включают преобразование данных, обучение и обеспечение непрерывности бизнеса.

Анализ показал, что сегодня наиболее распространены и часто применяются два популярных подхода к описанию требований:

– User story (или пользовательские истории) – это описание функциональной возможности ПО простыми, общими словами, составленное с точки зрения конечного пользователя. Цель пользовательских историй заключается в выделении конкретных функциональных возможностей продукта. Этот подход облегчает процесс разбиения крупных задач на более мелкие и последующую их детализацию. Такой метод дает возможность команде эффективно подходить к решению обширных задач, поочередно разбирая их и достигая промежуточных успехов. [5]

– Use Cases (или варианты использования) – представляют собой описание последовательности действий, которые система может выполнить в ответ на внешние воздействия от пользователей или других программных систем. Цель использования Use Cases в разработке программного обеспечения охватывает несколько важных аспектов. В первую очередь, когда система включает в себя различные компоненты, критически важно, чтобы вся команда, включая системного аналитика, обладала четким представлением о том, как эти компоненты взаимодействуют между собой. Use Cases предоставляют надежный и эффективный инструмент для построения общей картины функционала ПО и взаимодействия пользователя с ней. [4]

В эпоху быстрорастущих технологий, связанных с искусственным интеллектом (ИИ), ведущие компании, выпускающие программные продукты для моделирования требований, не всегда поспевают внедрять свои ИИ разработки. В связи с этим на мировом и российском рынках систем моделирования требований появилась слабо занятая ниша сервисов, автоматизирующих процесс моделирования требований. Один из перспективных сервисов – это генерация спецификаций по заданным параметрам. Существующие GPT генераторы способны автоматически создавать наборы требований, но зачастую они не всегда полны и требуют продолжительной ручной верификации. Причём этот процесс может занять больше времени, чем моделирование самого требования без ИИ помощника. Однако, существует более уместное применение ИИ помощника, прежде всего, в подготовке тестовых сценариев. В таком случае полнота и правильность сгенерированного тестового сценария в большей степени будет зависеть от выявленного требования, которое подготовил аналитик.

Также с развитием качественных инструментов разработки нейросетей снизился порог вхождения в проект по разработке ПО для инженеров по машинному обучению (ML инженеров). В связи с этим появилась возможность для создания собственных рекомендательных моделей нейросетей. Это означает, что при разработке большого количества проектов в системе моделирования требований (АИС МТТ) появится возможность создать на основе банка требований свою рекомендательную модель, которая будет подсказывать как можно автоматически улучшить требование.

Для того, чтобы оценивать критические в разработке требования, обладающие максимальным приоритетом важности, в современные ИАС вводят так называемые матрицы трассировки требований. Для автоматизации критического пути в реализации требований можно использовать

модернизированную матрицу трассировки требований - граф зависимостей, где зависимости измеряются определенной величиной, в отличие от той же матрицы трассировки. Предположим, что наши коэффициенты находятся в условном диапазоне [0,1], где: 0 – требования независимы друг от друга; 1 – требование блокирует работу над другим требованием.

В проекте, где определено 10 первоначальных требований графовая модель может выглядеть как представлено на рисунке 2.

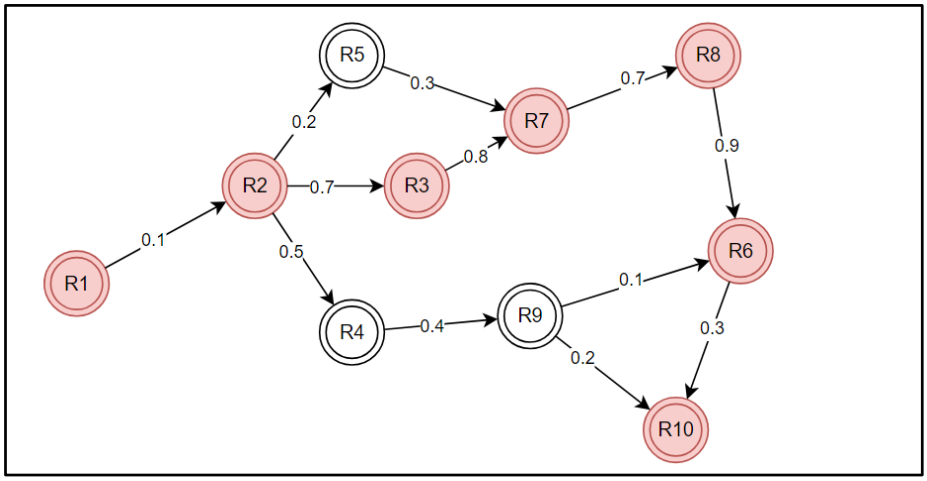


Рис. 2. Граф зависимостей между требованиями

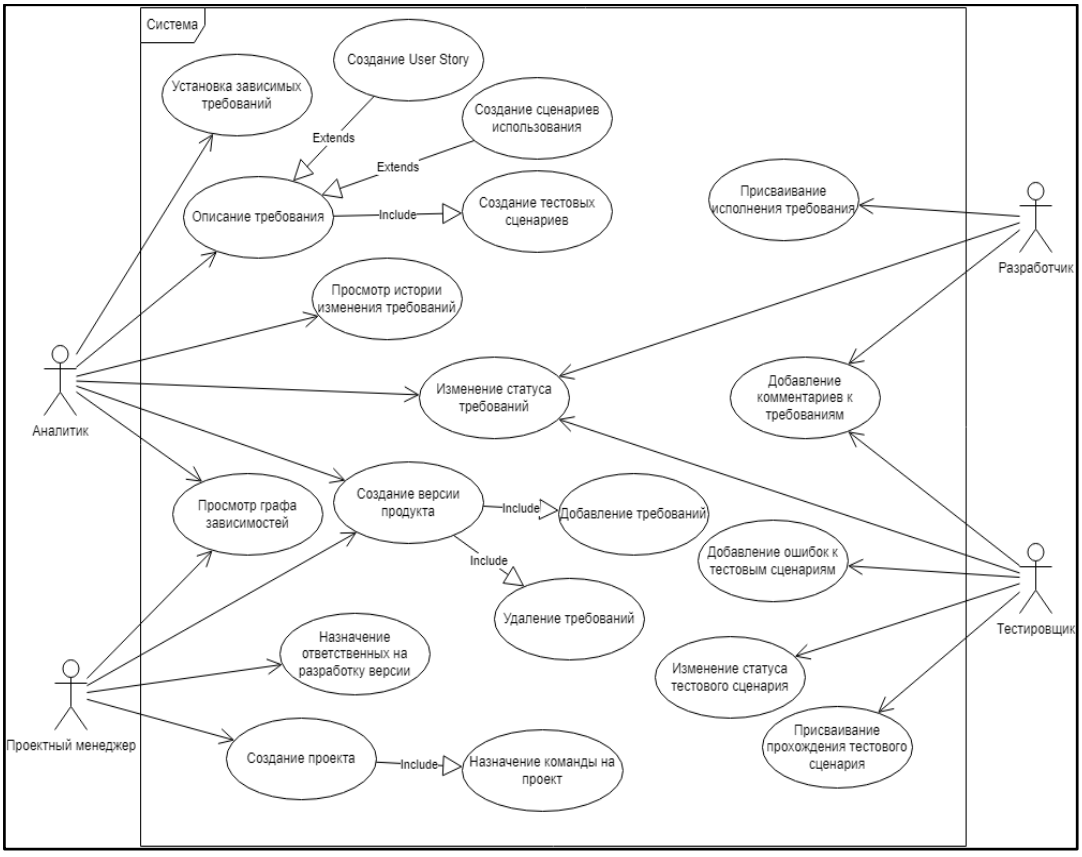


Рис. 3. Варианты использования системы

Для определения преимуществ и ограничений существующих сервисов был проведен анализ популярного программного обеспечения для моделирования требований к ПО: Jira, Polarion, HelixALM, ReqView, Jama, IBM Doors. Исследование показало, что у всех сервисов присутствует функциональность трекинга задач, но поддержки версионности на уровне самого сервиса есть только у Polarion, ReqView и IBM Doors. В части поддержки ИИ в разработке тестовых сценариев - в той или иной мере реализованы у Jira, Polarion, HelixALM и IBM Doors. Управлять ресурсами проекта можно в HelixALM, ReqView, Jama и IBM Doors. Стоит отметить, что функционал в виде графовой модели зависимостей требований нет ни у одного сервиса.

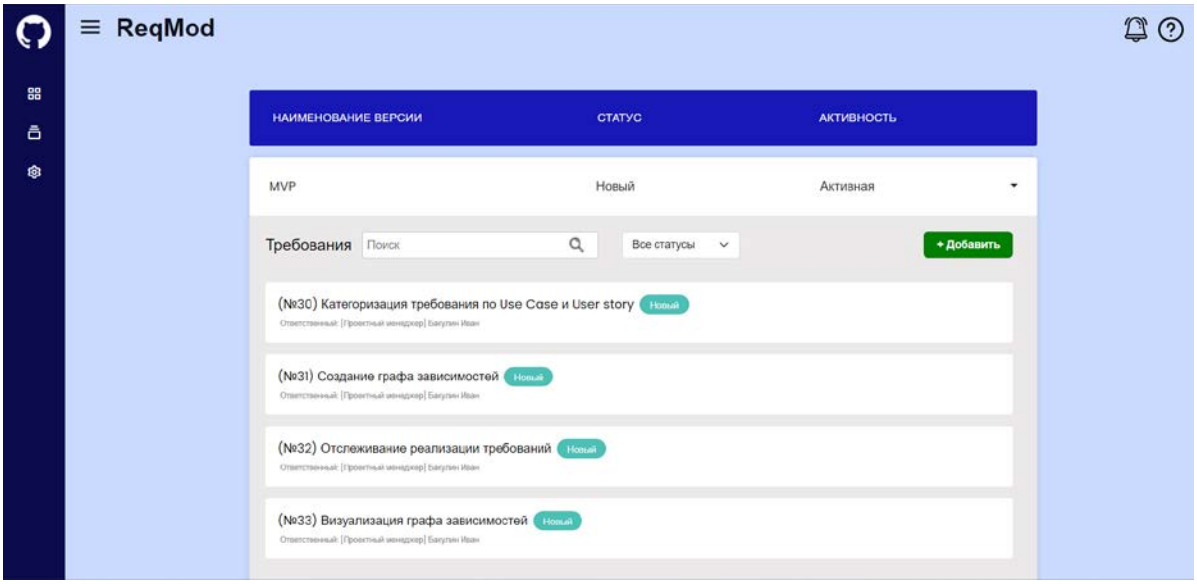


Рис. 4 Экран версий проекта системы

Анализ показал, что с функциональной точки зрения все выбранное ПО не обладает достаточной полнотой, что дает возможность автору смоделировать оптимальный требуемый функционал АИС МТТ и представить основные варианты использования и категории пользователей будущей системы на диаграмме Use Case (рис. 3). [5,6]

В результате был создан первый прототип автоматизированной информационной системы моделирования требований ReqMod, в разработке демонстрационной части ИАС МТТ за основу был взят процесс создания проекта и требования. Первым шагом для достижения целей по созданию была авторизация в системе, для чего был разработан экран входа. После успешной авторизации пользователь переходит на экран проектов. На главном экране отображаются созданные проекты, их статусы, и активность. При создании проекта автоматически системой создается MVP версия (продукт с минимальным жизнеспособным набором функций), она отображается при переходе в проект. К каждой версии причисляются требования для ее реализации, они отображаются при раскрытии версии. Требование создается в отдельном окне (рис. 4).

Для создания необходимо задать заголовок, описание, категорию и ответственного за исполнение. Также необязательным атрибутом для создания являются зависимые требования. При переходе в требование отображается граф зависимостей и информация о требовании (рис. 5).

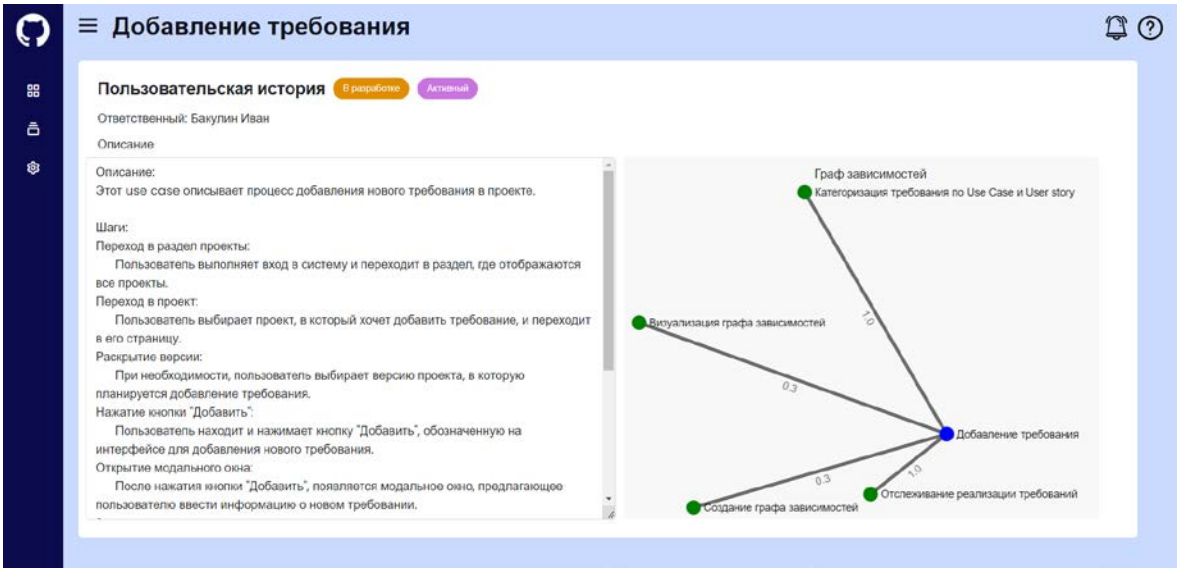


Рис. 5. Экран требования

Стоит отметить, что для визуализации графа зависимостей использовалась библиотека Sigma.js, некоторые формы и кнопки были разработаны с помощью библиотеки Bootstrap 5.3. [7,8]

Прототип АИС МТТ ReqMod был апробирован на студенческих проектах курсовых и выпускных квалификационных работ по разработке ПО. Результаты показали высокие результаты в части формализации требований, в том числе:

– Отмечены преимущества в части отображения зависимостей в виде графа – благодаря построению критического пути время на позиционирование требований в версии сокращается на 30%, а частота неудачных выборов времени выпуска на 10%.

– Жесткое управление версионностью проекта позволяет сократить время на управление на 20%.

Начальная версия включает в себя следующий минимально-достаточный функционал АИС МТТ:

– Авторизация и аутентификация пользователей;

– Добавление нового проекта в личный кабинет пользователя;

– Добавление ресурсов к проекту;

– Автоматическое создание MVP версии проекта при создании;

– Добавление требований к проекту и формирование системы требований;

– Категоризация требований по пользовательским сценариям и историям;

– Создание графа зависимостей системы требований;
– Визуализация графа зависимостей системы требований;
– Отслеживание реализации требований по статусам.

В дальнейшем развитии проекта планируется следующая функциональность: изменение ресурсов к проекту, автоматическое написание тестового сценария к требованию, получение рекомендаций по созданному требованию, добавление исполнителя, отправка push уведомлений о назначении исполнителя на версию проекта и об изменении статуса требования.

В заключении хочется отметить для разработчика важность автоматизации процессов работы с системой требований к программному обеспечению непосредственно в процессе разработки ПО, а также использованию современного эффективного отечественного программного инструментария моделирования требований, и важность для заказчика быстрое отражение изменения требований к ПО и своевременный выпуск требуемых релизов ПО, с чем может помочь система моделирования требований.

Список литературы

1. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии "ГОСТ Р 59194-2020" от 2020 // Официальный интернет-портал правовой информации. 2020.

2. Вигерс Карл, Битти Джой Разработка требований к программному обеспечению.” 3-е изд., дополненное. М.: Издательство «Русская редакция»; СПб. : БХВ-Петербург, 2014. 736 с.

3. BABOK v3, International Institute of Business Analysis, Toronto, Ontario, Canada.

4. Аксёнов А.С. Информационное обеспечение процесса разработки требований к высокотехнологичному продукту // Economics. 2017.

5. Mike Cohn User Stories Applied, for Agile Software Development // Indiana: 2009. 291 с.

6. Козлов А.С. Проектирование и исследование бизнес-процессов: учебное пособие. Москва: Московский психолого-социальный ин-т: Флинта, 2008. 266 с.

7. Bootstrap Documentation // Bootstrap [Электронный ресурс] URL: https://docs.spring.io (дата обращения: 10.05.2024).

8. Sigma Documentation // Sigma.js [Электронный ресурс] URL: https://www.sigmajs.org/docs (дата обращения: 10.05.2024).

Бакулин Иван Александрович, магистр, bakhome14@gmail.com, Россия, Москва, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

Червяков Леонид Михайлович, д-р техн. наук, профессор, chlm@mail.ru, Россия, Москва, Институт конструкторско-технологической информатики РАН,

Бычкова Наталья Александровна, канд. техн. наук, доцент, nabych@mail.ru, Россия, Москва, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR MODELING TECHNICAL REQUIREMENTS TO SOFTWARE PRODUCTS

I.A. Bakulin, L.M. Chervyakov, N.A. Bychkova

The article describes an information and analytical system for studying technical requirements for software products. The system was created to reduce the time it takes to design software based on the development of an IAS taking into account technical requirements. The subject area of requirements modeling, modern methods for automating the process of requirements modeling and additional services for measuring requirements are analyzed, and an overview of the methodology for requirements modeling is presented. A system for reviewing technical requirements has been developed: minimum requirements for the system, key business processes and security levels of the information and analytical system, the database structure has been designed, the role model has been defined and integration interaction has been implemented. The presented implementation of individual components of the information and analytical system: controllers, business logic, data logic model, interface screens of the information and analytical system, as well as implementation technologies justifies their choice. A methodology for deploying and operating the information and analytical system has been developed.

Key words: requirements modeling, business processes, technical requirements, information and analytical system, software design.

Bakulin Ivan Aleksandrovich, master, bakhome14@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow State Technological University "STANKIN",

Chervyakov Leonid Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, chlm@mail.ru, Russia, Moscow, Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences,

Bychkova Natalia Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent, nabych@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow State Technological University "STANKIN"

УДК 004.657
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-152-153

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОИСКОВЫХ ЗАПРОСОВ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Н.А. Смирнов, Л.М. Червяков, Н.А. Бычкова

В статье рассматривается разработка высоконагруженного приложения. Проводится анализ технологий обработки данных – Redis, PostgreSQL, Elasticsearch, языка программирования - golang, и фреймворка межсервисного взаимодействия – grpc, grpc-gateway. Описываются преимущества использования определенных методов и подходов в рамках высоконагруженных систем. В статье приводится информация по методологиям исследования, и по характеристикам машины, на которой производится тестирование всего приложения. Спроектирована архитектура информационно-аналитической системы, состоящая из: 3 сервисов – реверси прокси сервис, поисковый сервис, сервис агрегации данных; клиента; систем управления баз данных; оркестрации и контейнеризации всех сервисов. Описаны преимущества разработанной архитектуры информационно-аналитической системы. Разработана и продемонстрирована работа алгоритма повышения эффективности поисковых запросов. Реализован алгоритм кеширование данных, который необходимо для уменьшения времени получения ответа пользователю. Описана возможность переключения сервисов обработки данных на этапе распределения запроса в реверс прокси сервисе при неработоспособности основной поисковой системы. Продемонстрированы метрики, которые способны собирать статистику по работеприложения для дальнейшей аналитики работы системы и входящим запросам. По итогам всей разработки проведено нагрузочное тестирование и тестирование двух способов получения данных в разработанном приложении.

Ключевые слова: высоконагруженные системы, информационно-аналитическая система, protobuf, повышение эффективности, алгоритмы.

В современном мире информационные технологии играют решающую роль в нашей повседневной жизни. Функциональность поисковых запросов является жизненно важным компонентом практически каждой информационной системы, служащим различным целям. Особенно в высоконагруженных системах с растущей базой пользователей эта функциональность является необходимой. По мере того, как к системе присоединяется все больше пользователей, необходимость повышения производительности и эффективности становится все более важной.

Целью исследования является повышение эффективности при поисковых запросах в высоконагруженных системах.

Новизна исследования заключается в разработке новой системы, направленной на повышение эффективности и производительности поисковых запросов.

В работе используются теоретические методы исследования: анализ и моделирование. Проведен анализ существующих методов и технологий поисковых запросов в высоконагруженных приложениях, а также их возможные оптимизации с помощью реализации алгоритмов [1,2]. Описана разработка информационно-аналитической системы, с ее дальнейшим тестированием, а именно нагрузочным тестированием и сравнением производительности системы при различных подходах получения данных.

Все тестирование будет производиться на компьютере со следующими характеристикам: процессор - Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz; операционная система – Darwin; ОЗУ – 16 гигабайт DDR4. В данном исследовании также демонстрируется важность использования вспомогательных технологий для сбора информации по результатам обработки входящих запросов.

Важной частью исследования является выбор языка программирования, на котором будет написана серверная часть высоконагруженного приложения. В области обработки данных нужно подобрать такую систему управления данными, которая будет иметь гибкий функционал, высокую производительности, а также иметь возможность получать релевантность запрашиваемых данных.

Существует множество языков программирования, на которых пишут бекенд. В нашем же случае, стоит ориентироваться на тот фактор, что приложение будет высоконагруженное. Это означает, что язык программирования должен быстро обрабатывать поступающие данные, иметь поддержку многопоточности, а также иметь поддержку сетевых приложений. Это являются наиболее важными критериями при выборе инструмента для написания кода. Отмечу современный язык программирования – golang. Этот язык хорошо себя зарекомендовал и используется в высоконагруженных системах в самых больших корпорациях, таких как: МТС Банк, Яндекс, Авито, Тинькоф, Сбербанк. Основным его преимуществом является планировщик потоков, который контролирует легковесные потоки на уровне программы, а не операционной системы [3,4].

В случае с системами баз данных будут использоваться такие технологии, как PostgreSQL, Elasticsearch, Redis. Проведем анализ выбора данных технологий. Redis является хорошим инструментом для хранения каких-либо данных в операционной памяти машины. Данный процесс называется кеширование. Его главной задачей является хранение временных, но часто запрашиваемых данных в быстро доступном месте для их получения. PostgreSQL реляционная база данных, с наличием определенных правил по расположению данных в таблицах. Ее использование обусловлено долгосрочным хранением данных на жестком диске, а также быстрым способом получения данных путем выполнения запроса с использованием фильтрации оператора where по индексу. Ключевым звеном в данном приложении является технология Elasticsearch. В рамках полнотекстового поиска он имеет более гибкий функционал, по сравнению с остальными системами управления баз данных. Данная технология способна параллельно обрабатывать большие объемы данных, что дает ей еще больше преимущества перед остальными конкурентами на рынке. В Elasticsearch используются алгоритмы ранжирования. Алгоритмы учитывают частоту встречаемости терминов в документе, их вес внутри документа по сравнению с их весом во всей коллекции документов и другие факторы, чтобы определить, насколько хорошо документ соответствует запросу. Рассматриваемая система управления баз данных легко взаимодействует с технологией Kibana, которая

предназначена для анализа и визуализации поступающих запросов и хранимых коллекций [5,6].

С учетом описанных выше особенностей данного приложения, была спроектирована ее модель, которая представляет из себя микросервисную архитектуру (рис. 1).

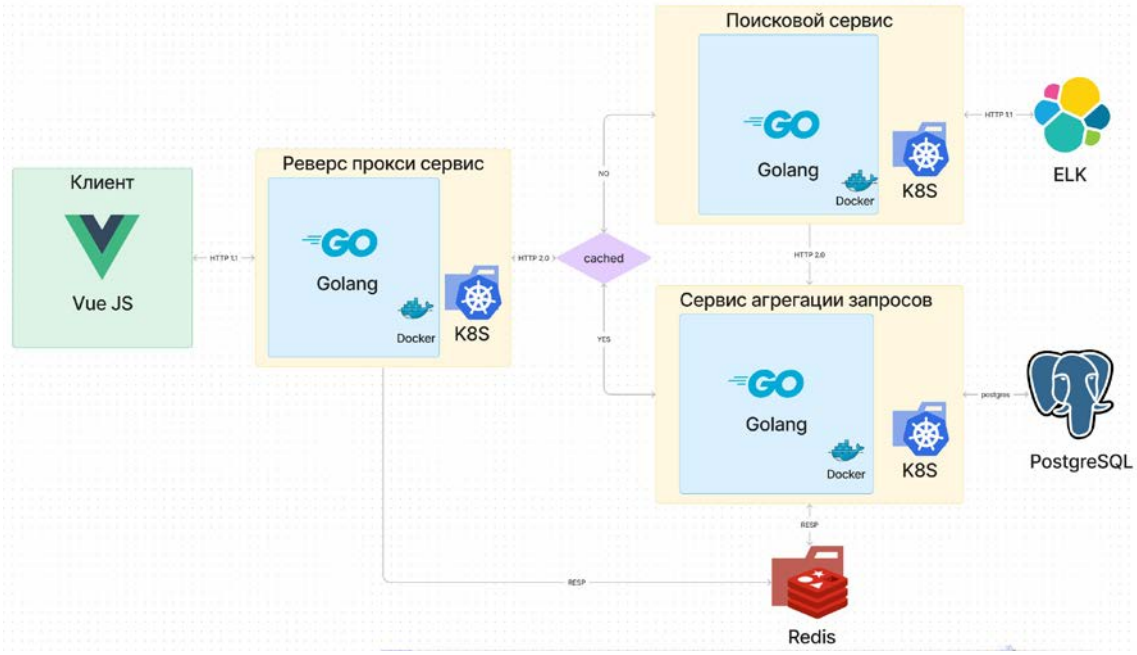


Рис. 1. Архитектура информационно-аналитической системы

Данная архитектура была выбрана в связи с ее высокой отказоустойчивостью и легкостью в масштабировании системы. Каждый сервис расположен в кластере технологии kubernetes, что позволяет автоматически поднимать экземпляры сервисов, которые перестали работать из-за каких-то внутренних проблем. Сервисы имеют несколько реплик в кластере kubernetes, это необходимо для балансировки нагрузки на систему. В качестве фреймворка для взаимодействия данных используется – gRPC между внутренними сервисами, и gRPC-gateway использует реверс прокси сервис. Стоит отметить, что данный фреймворк работает поверх protocol buffers. Он работает по умолчанию на протоколе http/2 и использует бинарную десериализацию данных, что гарантирует более высокую скорость доставки данных и снижает нагрузку [7,8].

На рис. 2 представлен алгоритм кеширования данных. Он нацелен на распределение запросов по сервисам, и снижением нагрузки с основного сервиса поисковых запросов.

Важной частью данного алгоритма является сервис агрегации данных. Данный сервис отвечает за получение и добавление данных в кеш Redis. Redis представляет из себя хранилище в виде пары ключ- значение. Ключ имеет составной вид и создается он из следующих строк api+query: api – URL запроса, который был вызван с клиента, и query – поисковые данные. Значением является массив из целочисленных типов данных, а именно

уникальных идентификаторов поисковой сущности. Данный принцип хранения данных гарантирует получение уникальных значений под разные запросы с возможными одинаковыми поисковыми значениями, а также дает возможность использовать оперативную память машины менее ресурс затратно. Пара добавляется в кеш из поискового сервиса в отдельном запущенном потоке. Это происходит, если в полученном запросе в поисковом сервисе логическое значения cache истинно.

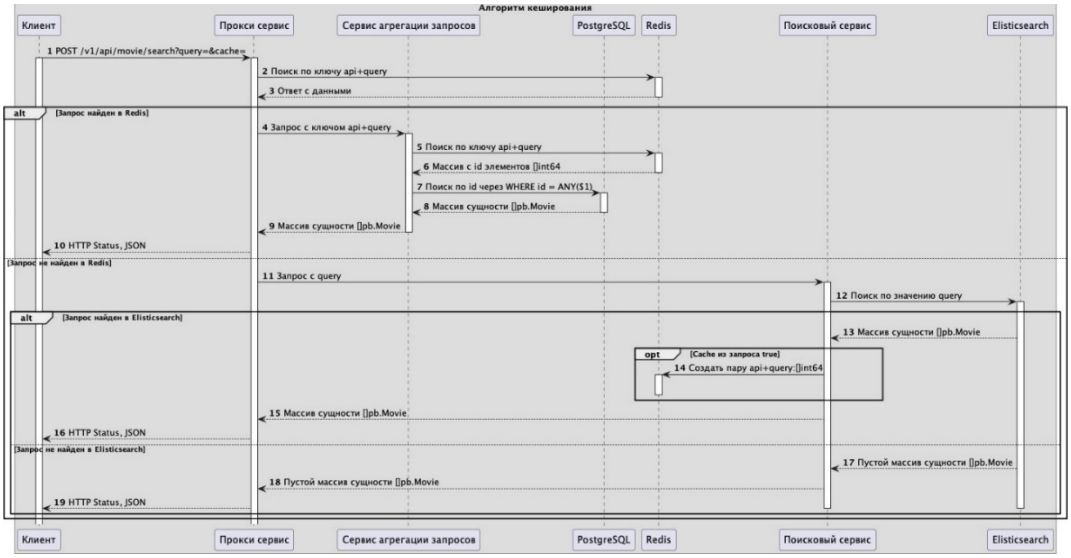


Рис. 2. Диаграмма последовательности алгоритма кэширования

В случае, если ключ запроса был найден в кеше, то отправляется запрос с реверс прокси сервиса в сервис агрегации данных на получение значений, которые необходимо вернуть в ответе клиенту. В процессе работы сервис получает массив и производит выборку из элементов массива по всем уникальным идентификаторам в таблице PostgreSQL через фильтрацию оператора where по первичному ключу, что гарантирует быстрое получение данных. Полученные экземпляры добавляются в массив структур, который был сгенерирован через protocol buffers. Взаимодействие между всеми сервисами происходит по http/2.

Помимо кеширования, сервис агрегации данных является резервным сервисом для выполнения основных поисковых запросов. Сервис работает в данном режиме в случае, если поисковый сервис перестал работать, либо вернул 500 статус код. В качестве резервной системы управления баз данных представлен PostgreSQL. Данный подход не дает полностью сломаться системе, запросы будут медленнее и ответы будут менее релевантны, однако приложение будет работать.

Важной часть приложения является сбор метрик по его работе. Метрики могут говорить о пропускной способности приложения, возможных сбоях, а также их можно использовать для анализа предпочтений пользователей. На рис 3. продемонстрированы метрики состояния работы сервисов и количественных метрики поступающих запросов.



Рис. 3. Метрики информационно-аналитической системы

Было проведено тестирование разработанной системы (табл. 1), а именно нагрузочное тестирование и тестирование производительности системы при различных подходах получения данных.

Нагрузочное тестирование показало, что система успешно справляется с большой нагрузкой в рамках высоконагруженных приложений (табл. 2). Результаты показали стабильную и высокую успешность запросов, с незначительным средним временем задержки и низким уровнем ошибок. Под тестированием производительности системы при различных подходах получения данных, имеется ввиду поиска в кеше и поиск в elasticsearch. В процессе тестирования использовалось 12 параллельных запросов, и они выполнялись одинаковый промежуток времени.

Таблица 1

Метрики нагрузочного тестирования

Обозначение метрики	Результат метрики
Request count	*24000*
Time	*1m59.995032502s*
Success rate	*100%*
Errors	*[]*
Mean latency	*16.606096ms*
Maximum latency	*1.165141733s*
Throughput (bytes/s)	*159.997290642*

Таблица 2

Тестирование производительности – результаты поиска

Результаты поиска в кеше			
Операции	Время на операцию	Аллокации памяти	Выделение памяти
496	2.84 мс	57.5 КБ	874 allocs/op
Результаты поиска в elasticsearch			
Операции	Время наоперацию	Аллокациипамяти	Выделение памяти
145	10.55 мс	57.8 КБ	897 allocs/op

Результаты тестирования показали, что увеличилась скорость выполнения запросов, снизилась нагрузка на ресурсы и сервисы путем распределения запросов, увеличилась пропускная способность.

В заключении можно сказать, что разработанная система хорошо себя проявила при нагрузочном тестировании. Алгоритм поиска в кеше показал нам, что при его использовании приложение работает в 3.7 раза быстрее, тем самым повысил эффективность при поисковых запросах в высоконагруженной системе. Нагрузочное тестирование было выполнено успешно, показов среднее незначительное время задержки. Система способна собирать и предоставлять метрики по результатам обработки запросов. Система готова справляться с высокой нагрузкой в продуктивной среде.

Список литературы

1. Шукла П., Elasticsearch, Kibana, Logstash и поисковые системы нового поколения. СПб.: Питер, 2019. 352 с.

2. Клеппман М. Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка. СПб: Питер. 2018. 640 с.

3. Харшани Т. 100 ошибок Go и как их избежать. СПб.: Питер, 2024. 480 с.

4. Касун И. gRPC: запуск и эксплуатация облачных приложений. Go и Java для Docker и Kubernetes. СПб.: Питер, 2021. 224 с.

5. Мартин Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения. СПб.: Питер, 2021. 352 с.

6. Лоре А. Проектирование веб-API. М.: ДМК Пресс. 2020. 440 с.

7. Pushpa C.N., Thriveni J., Venugopal K.R., Patnaik L.M. Improving Response Time and Throughput of Search Engine with Web Caching. International Journal of Engineering Research & Technology. Volume 01, issue 04.

8. Andrew S.T., Maarten Van Steen, Distributed systems: princeples and paradigms. Upper Saddle River.

Смирнов Никита Анатольевич, магистр, n3ksmirnov@gmail.com, Россия, Москва, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

Червяков Леонид Михайлович, д-р техн. наук, профессор, chlm@mail.ru, Россия, Москва, Институт конструкторско-технологической информатики РАН,

Бычкова Наталья Александровна, канд. техн. наук, доцент, nabych@mail.ru, Россия, Москва, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF SEARCH QUERY IN HIGHLY LOADED APPLICATIONS

N.A. Smirnov, L.M. Chervyakov, N.A. Bychkova

The article considers the development of a high-load application. The analysis of data processing technologies is carried out - Re-dis, PostgreSQL, Elasticsearch, programming language - golang, and the framework of interservice interaction - grpc, grpc-gateway.

The advantages of using certain methods and approaches in the framework of high-load systems are described. The article provides information on research methodologies and on the characteristics of the machine on which the entire application is tested. The architecture of the information and analytical system is designed, consisting of: 3 services - reverse proxy service, search service, data aggregation service; client; database management systems; orchestration and containerization of all services. The advantages of the developed architecture of the information and analytical system are described. The operation of an algorithm for increasing the efficiency of search queries is developed and demonstrated. A data caching algorithm is implemented, which is necessary to reduce the time it takes to receive a response to the user. The possibility of switching data processing services at the stage of query distribution in the reverse proxy service when the main search engine is inoperative is described. Metrics are demonstrated that are capable of collecting statistics on the application operation for further analysis of the system operation and incoming queries. Based on the results of the entire development, load testing and testing of two methods of obtaining data in the developed application were carried out.

Key words: high-load systems, information and analytical system, protobuf, increasing efficiency, algorithms.

Smirnov Nikita Anatolyevich, master, n3ksmirnov@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow State Technological University «STANKIN»,

Chervyakov Leonid Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, chlm@mail.ru, Russia, Moscow, Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences,

Bychkova Natalia Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent, nabych@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow State Technological University «STANKIN»

УДК 338.245 (470)
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-158-159

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТА ПОЛИГОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ВЫБОРА КОЭФФИЦИЕНТА ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО МОНИТОРИНГА

А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин, С.А. Васин, Д.А. Пронин

Учет статистических характеристик в анализе технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования на примере изделия ПУ-55 (изделие 3) для оценки его ремонтопригодности и частоте ремонта на полигонах. Выявление типа коэффициента по которому лучше проводить мониторинг поломок в следующие периоды времени.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, полигонное оборудование, систематизация мониторинга, ритмичность производственного цикла, моделирование производственного процесса.

Статистический анализ в программном пакете SPSS позволил получить следующие характеристики по ремонту и техническому обслуживанию для пульта управления ПУ-55 (табл. 1).

Таблица 1

Статистические характеристики коэффициента поломок по 3 типу изделий полигонного оборудования

Статистика		
Изделие 3		
N	Валидные	4
	Пропущенные	33
Среднее		,2150
Стандартная ошибка среднего значения		,09509
Медиана		,1250
Мода		,11[a]
Среднекв.отклонение		,19018
Дисперсия		,036
Асимметрия		1,989
Стандартная Ошибка асимметрии		1,014
Эксцесс		3,963
Стандартная ошибка эксцесса		2,619
Диапазон		,39
Минимум		,11
Максимум		,50
Сумма		,86
Процентили	25	,1125
	50	,1250
	75	,4075

На основе анализа можно сделать следующие выводы. Сначала рассмотрим процентили. В результате расчетов были определены первый, второй и третий процентили (квартили).

В таблице 1 видно, что 25% данных имеют значение коэффициента поломок не выше 0,11, 50% данных – не выше 0,13, а 75% данных – не выше 0,41. Эти показатели определяют частоту ремонта изделий на полигонах. В среднем изделия третьего типа классифицируются как качественные, так как ремонтируются только 11 из 100 единиц.

В категории «Разброс» анализируем следующие меры разброса. Стандартная ошибка среднего отклонения, являющаяся мерой разброса измеренных значений, равна квадратному корню из дисперсии. В нашем случае стандартная ошибка среднего составляет 0,09509, что указывает на то, что примерно 9% (0,09*2=0,18) значений выборки выходят за рамки нормального распределения. Это говорит о том, что значения коэффициента поломок отклоняются от нормального распределения.

Рассмотрим следующий параметр – дисперсию. Дисперсия, представляющая собой квадрат стандартного отклонения, является мерой разброса измеренных значений. В данном случае дисперсия составляет 0,036, что указывает на значительное отклонение от среднего значения в рамках нормального распределения. Это свидетельствует о том, что использование коэффициента поломок как среднеарифметического значения данных измерений является оправданным, поскольку отклонение от среднего составляет 0,4%.

Далее перейдем к следующему параметру – диапазону. В ходе исследования выяснили, что разница между изделиями, требующими ремонта типа 3, составляет 0,39, что указывает на более высокую частоту ремонтов

для данного типа по сравнению со средним значением (0,33) для других типов изделий. Это говорит о том, что ремонтные бригады для изделий типа 3 призываются довольно часто, и существует необходимость иметь запасные части для них на складе. Однако это актуально лишь в случае, если будет решен вопрос с изделиями первого типа, показатели которых хуже.

Тем не менее, данные по третьему типу изделий не следуют нормальному распределению из-за стандартной ошибки среднего отклонения, находящейся на уровне 9%. Поэтому принимать решения о организации ремонтных работ на основе этих статистических данных неправомерно, и требуется дальнейший мониторинг информации по данному типу изделий.

Следующим расчетным значением является среднеквадратичное отклонение. Для коэффициента поломок изделий третьего типа в таблице 1 оно составляет 0,19018, что означает, что большинство выбранных значений находятся близко к среднему, указывая на наличие нормального распределения в данных.

Давайте проанализируем характеристику «Среднее значение». Оно представляет собой арифметическое среднее всех измеренных значений, вычисляемое как сумма значений, деленная на их количество. В ходе анализа коэффициента поломок была получена величина 0,2150, что указывает на то, что в среднем 22 изделия из 100 нуждаются в ремонте за данный период времени, что ниже среднего показателя для остальных изделий (26 штук).

Следующая характеристика — медиана, которая указывает значение на шкале измерений, разделяющее все измеренные значения на две равные части. В нашем случае для G(t) медиана равна 0,13, что означает, что значения распределены равномерно относительно данного показателя.

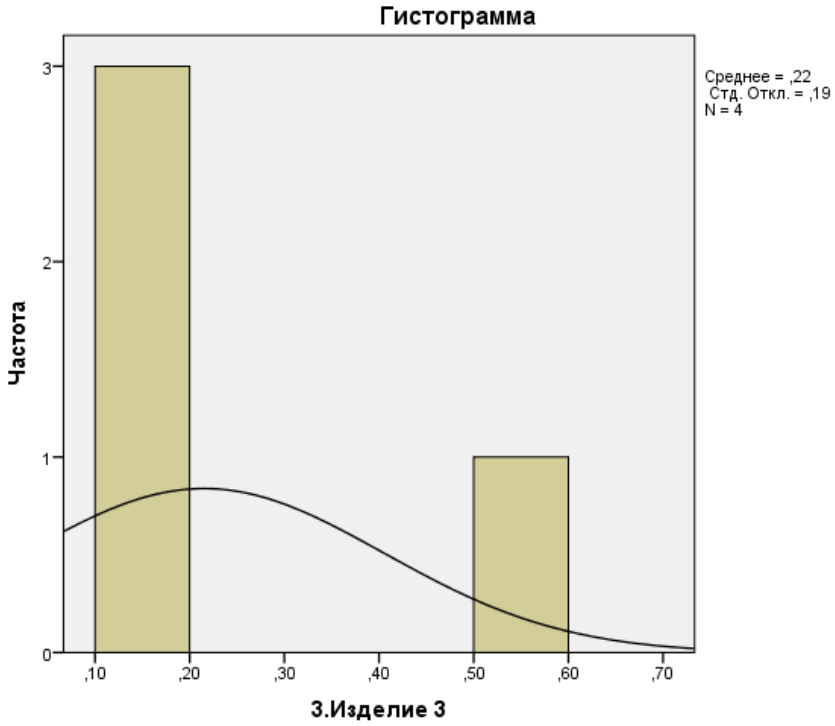
Далее рассмотрим «моду», которая определяет значение, наиболее часто встречающееся в наборе данных. Для G(t) мода составляет 0,11, что подтверждает предположение о том, что 11% изделий требуют ремонта в указанный период по данному типу продукции. Поскольку у этого значения есть дополнительно уточняющее значение «a», это свидетельствует о том, что программа не смогла точно установить значение моды и необходимы дополнительные данные для её определения.

Характеристика «Сумма» отражает общее количество изделий, нуждающихся в ремонте по данному типу. В нашем случае это значение составляет 0,86, что указывает на общий коэффициент поломок для данного типа полигонного оборудования.

В разделе «Распределение» были изучены показатели «асимметрия» и «эксцесс». В таблице 1 асимметрия составила 1,989, что показывает, насколько распределение частоты отклоняется от симметричного. В нашем случае положительное значение асимметрии говорит о том, что коэффициент поломок не имеет нормального распределения и смещён в сторону увеличения.

Теперь обратим внимание на «эксцесс». При анализе коэффициента поломок второго типа изделий он составил 3,963. Эксцесс указывает на то,

является ли распределение более пологим (при высоком значении) или крутым. В данном случае нормальное распределение считается пологим.



Гистограмма нормального закона распределения коэффициента поломок по третьему типу изделий полигонного оборудования

В итоге построенная гистограмма нормального распределения, показанная на рисунке, формирует нормальное распределение по коэффициентам поломок третьего типа изделий и показывает пологий вид этого распределения. Предыдущие статистические характеристики сообщают, что это распределение имеет двойственную структуру и может учитываться ограниченно в анализе технического обслуживания и ремонта для третьего типа изделий и сообщает о частично приемлемом качестве данного типа изделий, и редком ремонте на полигонах. Для данного типа изделий лучше провести мониторинг данных по коэффициенту поломок поквартально в следующие периоды времени.

Список литературы

1. Голубева Н.В. Математическое моделирование систем и процессов: учебное пособие. СПб.: Лань, 2013. 192 с.

2. Кузьмин В.В. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения. М.: Высшая школа, 2008. 279 с.

3. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов. М.: КД Либроком, 2018. 416 с.

4. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Уч. М.: Инфра-М, 2017. 160 с.

5. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учеб. пособие для студ. вузов. М.: Высш. шк., 2004. 400 с.

6. Белько И.В. Теория вероятностей и математическая статистика. Примеры и задачи: учеб. пособие для вузов / И.В. Белько, Г.П. Свирид; под ред. К. К. Кузьмина. Мн.: Новое знание, 2002. 250 с.

7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для студ. вузов. М.: Высш. шк., 2004. 480 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,

Васин Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор-консультант, vasin_sa53@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пронин Даниил Андреевич, студент, vasin_sa53@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF MAINTENANCE AND REPAIR OF LANDFILL EQUIPMENT AND SELECTION OF A COEFFICIENT FOR FURTHER MONITORING

A.E. Lukyanov, O.V. Pantyukhin, S.A. Vasin, D.A. Pronin

Accounting of statistical characteristics in the analysis of maintenance and repair of landfill equipment using the example of the PU-55 product (product 3) to assess its maintainability and the frequency of repairs at landfills. Identification of the type of coefficient by which it is better to monitor breakdowns in the following time periods.

Key words: maintenance and repair, landfill equipment, systematization of monitoring, rhythmicity of the production cycle, modeling of the production process.

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,

Vasin Sergey Alexandrovich, doctor of technical sciences, consulting professor, vasin_sa53@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pronin Daniil Andreevich, student, vasin_sa53@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 62-5
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-163-164

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В ТАРЕ НА РОБОТИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЯХ РОЗЛИВА

Е.С. Квас, А.П. Бобрышов, В.П. Кузьменко, С.В. Солёный

В работе рассматривается задача автоматизированного контроля уровня разлитой в прозрачную стеклянную тару жидкости для высокопроизводительных роботизированных линий розлива, где динамические условия (движение тары, наклоны, скорость потока, заторы) усложняют определение объёма при контроле переливов и недоливов. Целью исследования является разработка алгоритма, обеспечивающего достаточный контроль уровня недолива и перелива в таре в реальном времени с учетом динамических условий работы роботизированной линии розлива. В основе алгоритма лежит адаптивный метод сегментации, применяется метод расчета динамического порога интенсивности пикселей изображения с учетом текстурных контрастов. Произведена проверка работоспособности и корректности работы алгоритма на полностью прозрачной таре бутылочной формы максимальным объемом 450 мл при статичных условиях и при имитации движения тары с учетом возможного наклона жидкости при движении до 10°. Уникальность алгоритма заключается в его адаптивности за счет использования динамического порога интенсивности пикселей, зависящего от локальных условий линии. По результатам верификации алгоритм показал до 99% корректного определения перелива, недолива и наклона жидкости, что говорит о возможности его применения в производственных условиях.

Ключевые слова: техническое зрение, контроль качества роботизированных линий розлива, адаптивная сегментация изображения, динамический порог интенсивности пикселей, контроль уровня жидкости.

Роботизированные линии розлива (РЛР) являются неотъемлемой частью технического прогресса предприятий пищевой, косметической, химической промышленности. РЛР являются основой серийного выпуска и упаковки сыпучих или жидких материалов и требуют постоянного контроля качества выполнения данных производственных операций, с учетом множество параметров, особенно при заполнении тары, укупорке, маркировки, а также своевременного выявления дефектов, особенно как недоливов и переливов [1-3]. Из-за того, что требования к скорости и эффективности производства и упаковки продукции постоянно растут, решение сопутствующих задач контроля качества производственных процессов становится все сложнее.

Несмотря на значительный прогресс в развитии промышленных систем технического зрения (СТЗ), их внедрение нередко сопровождается трудностями, связанными с узкоспециализированными требованиями конкретного производственного кейса. При этом сами СТЗ как правило проектируется для выполнения универсальных задач и их адаптация под конкретную специфику производства, конкретную производственную операцию нередко сопровождается существенными сложностями и высокими экономическими и трудозатратами. При этом, контроль процессов операторами

роботизированных линий, хотя и сохраняет свою актуальность в отдельных сценариях, однако демонстрирует существенные ограничения, связанные с неспособностью операторов обеспечивать постоянное качество и скорость инспекции, соответствующую текущим стандартам промышленной автоматизации [4, 5].

В этой связи развитие алгоритмов применения технологии обработки изображений в реальном времени представляют собой перспективное решение, способное компенсировать недостатки как СТЗ, так и человеческого контроля, а их корректное применение и настройка могут существенно повысить как эффективность инспекционных процессов, так и общее качество выпускаемой продукции [6-9].

Автоматизированные системы визуального контроля представляют собой перспективный инструмент для повышения точности и стабильности таких операций, однако обзор литературы показывает, что существующие решения обладают рядом ограничений, требующих дальнейшего исследования. Например, в работе [10, 11] представлена система автоматизированной визуальной инспекции, основанная на применении методов искусственного интеллекта для выявления дефектов заполнения и проверки герметичности крышек. Хотя система демонстрирует высокую точность, её недостатком является необходимость значительных затрат вычислительных ресурсов при адаптации к изменениям, например, формы и размера бутылок.

Другие исследования, предлагают использовать алгоритмы обработки изображений, которые меньше зависят от изменений конфигурации объекта. Эти подходы эффективны для контроля уровня жидкости, обнаружения загрязнений бутылок и проверки качества этикеток [12, 13]. Однако описанные методы также имеют определенные недостатки, связанные с тем, что использование цветных изображений увеличивает время их обработки и накладывает ограничения на их применение в высокоскоростных производственных линиях, при этом, большинство систем требуют сложной перенастройки при изменении параметров продукции, что увеличивает время простоя оборудования [14-16].

Таким образом, проведенный аналитический обзор научной литературы по теме исследований подчёркивает актуальность разработки новых алгоритмов распознавания, способных объединять и балансировать между вычислительной эффективностью, адаптивностью, точностью и быстродействием.

1. Постановка задачи. РЛР с производительностью до 90 000 штук бутылочной тары в час представляют собой сложную и неунифицированную систему, параметры контроля качества производственных процессов для которой сильно зависят от условий и типа производства, что делает затруднительным применение типовых решений в области контроля качества продукции и производственных процессов. При таких масштабах производительности в РЛР для контроля уровня недоливов и переливов используются основанные на обработке изображений системы технического зрения, которые сталкиваются с рядом нерешённых проблем, связанных

с необходимостью обработки больших объёмов данных в реальном времени, учёта разнообразия формы тары (возникает необходимость перенастройки системы), материалов жидкости и отражающих особенностей упаковки и жидкости, а также влиянием внешних факторов освещенности. При этом большинство существующих решений не способны интегрироваться с облачными сервисами для долгосрочного мониторинга производственных данных, что также снижает эффективность таки систем.

Главная задача при повышении качества и эффективности контроля недоливов и переливов в таре – это создание алгоритма для СТЗ, который:

обеспечивает точное определение уровня заполнения жидкости независимо от формы и прозрачности бутылки;

обладает достаточной вычислительной мощностью, чтобы обрабатывать данные в реальном времени при скорости 25–30 единиц тары в секунду;

сводит к минимуму ручные настройки и калибровки, тем самым ускоряя ввод системы в эксплуатацию;

легко встраивается в аналитические платформы для мониторинга и прогнозирования возможных неисправностей.

Сложность в том, что перечисленные требования нередко противоречат друг другу: увеличение скорости анализа обычно снижает точность, а гибкость и адаптивность могут усложнять конфигурацию под конкретные типы бутылок и жидкости. Особенно это заметно при работе с прозрачными жидкостями и стеклянной прозрачной тарой — они склонны к ошибкам в определении объёма. Поэтому необходим подход, сочетающий высокую производительность, точность и универсальность, а также позволяющий быстро перенастраивать систему под конкретные задачи.

Отсюда возникает необходимость разработки методов, выделяющих ключевые признаки, невосприимчивые к внешним условиям, и их последующей интеграции в аналитическую систему. Такая система должна обеспечивать достаточную точность контроля недолива и перелива в рамках производственного процесса РЛР.

2. Материалы и методы. Система контроля уровня жидкости предназначена для интеграции в производственные линии розлива и представляет собой автономное устройство. Основное назначение – автоматическое измерение уровня жидкости в бутылках на скорости перемещения до 90 000 штук бутылочной тары в час. Система функционирует на принципах оптического контроля с использованием методов компьютерного зрения.

Концепция системы основана на измерении интенсивности света, проходящего через бутылку. Прозрачная часть бутылки над уровнем жидкости пропускает больше света, чем жидкость, благодаря чему можно выделить границу уровня. Это основано на законе Бугера–Ламберта:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

где I – интенсивность света, прошедшего через среду (пиксели камеры, лк; I_0 – интенсивность света перед прохождением через среду лк; μ – коэффициент поглощения материала 1/мм; x – толщина среды, через которую

проходит свет, мм.

Для прозрачной жидкости μ близок к нулю, а для стекла и воды значения различны, что позволяет выделить границу раздела.

Для анализа уровня жидкости используются методы обработки изображений. Камера захватывает изображение бутылки, после чего оно преобразуется в градации серого:

$$I(x, y) \in [0,255],$$

где $I(x, y)$ – интенсивность света в пикселе с координатами (x, y), лк.

На следующем этапе проводится пороговая сегментация S:

$$S(x,y)\begin{cases}1, & I(x,y) > T\\ 0, & I(x,y) \le T\end{cases};$$

где $S(x, y)$, – бинарная карта сегментации; T – значение порога, определённое экспериментально. Сегментированное изображение представляет собой бинарную карту, где пиксели, соответствующие жидкости, имеют значение 1.

После сегментации выполняется морфологическая обработка, включая операции «открытие» и «закрытие», чтобы удалить шумы и выделить только связные области. Для выделенной области рассчитывается высота жидкости в пикселях:

$$H_{\text{пикс}} = max(y) - min(y),$$

где $max(y)$ и $min(y)$ – координаты верхней и нижней границ сегментированной области.

Высота жидкости в физических единицах определяется как:

$$h_{\text{жид}} = \frac{H_{\text{пикс}}}{N_{\text{пикс}}} \cdot H_{\text{бут}},$$

где $H_{\text{бут}}$ – фактическая высота бутылки, мм; $N_{\text{пикс}}$ – общее количество пикселей по высоте изображения.

Высота жидкости на изображении ($H_{\text{пикс}}$) рассчитывается согласно следующему выражению:

$$H_{\text{пикс}} = \frac{h_{\text{жид}}}{k_{\text{пикс}}},\ k_{\text{пикс}} = \frac{H_{\text{бут}}}{N_{\text{пикс}}},$$

где $k_{\text{пикс}}$ – коэффициент преобразования зависящий от параметров камеры и размеров тары.

Результаты анализа уровня жидкости передаются на сервер, где они сохраняются для дальнейшей обработки. На сервере проводится статистический анализ, включая подсчёт количества бутылок с недоливом или переливом, построение графиков изменений уровня жидкости для выявления трендов, оповещения в случае значительных отклонений.

Также метод морфологической обработки может быть представлен через структурное фильтрование элементов, где «открытие» - (∘) и «закрытие» - (·):

$$S'(x, y) = (S \circ M) \cdot M,$$

где M – структурный элемент; $S'(x, y)$ – отфильтрованное изображение.

Это означает, что помимо стандартных операций «закрытие» и «открытие», используется адаптивный структурный элемент M (x,y), изменяющий свою форму в зависимости от размера связанной компоненты.

Это позволяет эффективно фильтровать шумы и выделять значимые области.

Тогда для анализа выделенных областей используется метод поиска связанных компонентов. Каждая выделенная область характеризуется её размером A_i (в пикселях), где i – номер области. Если $A_{i_порог} < A_{порог}$, то область считается шумом и удаляется:

$$S''(x,y)\begin{cases} S'(x,y), & A_i \geq A_{порог} \\ 0, & A_i < A_{порог} \end{cases};$$

Оба представленных способа позволяют устранить шумы и выделить связные области.

Для преобразования высоты уровня жидкости в физический объём используется формула объёма цилиндра:

$$V = \pi r^2 h_{жид},$$

где V – объём жидкости, мл; r – радиус основания бутылки, мм; $h_{жид}$ – высота жидкости, мм.

Радиус r изменяется с высотой бутылки h, так как бутылка имеет сложную геометрию.

Для участков, где радиус изменяется (например, горлышко бутылки), применяется линейная интерполяция:

$$r(h) = r_{осн} + \frac{h_{жид} - h_{переход,min}}{h_{переход,max} - h_{переход,min}} \cdot (r_{горл} - r_{осн});$$

$r(h)$ – радиус бутылки, мм, на текущей высоте $h_{жид}$; $r_{горл}$ – радиус горлышка, мм; $h_{переход,мин}$ – начальная высота сужения, мм; $h_{переход,макс}$ – максимальная высота переходной области, мм.

Объем жидкости определяется как сумма объемов цилиндров для каждого из участков:

$$V = \sum_{i=1}^{n} \pi r(h_i)^2 \Delta h_{жид},$$

где $r(h_i)$ определяется как описано выше для каждого слоя i; $\Delta h_{жид}$ – толщина слоя жидкости в миллиметрах, мм.

При анализе изображения высота жидкости $h_{жид}$ первоначально измеряется в пикселях $Н_{пикс}$. Для преобразования этого значения в физическую высоту в миллиметрах используется соотношение между общей высотой бутылки в пикселях и её физической высотой:

В процессе анализа изображения в системе контроля уровня жидкости важно учитывать вычислительную эффективность и качество обработки. Для этого используется преобразование исходного изображения из цветовой модели *RGB* (*Red, Green, Blue*) в градации серого, что позволяет уменьшить количество обрабатываемых каналов с трёх до одного и снижает вычислительную сложность и объёмы данных.

Цветное изображение в модели *RGB* представляет собой набор трёх каналов: красного (R), зелёного (G) и синего (B), где интенсивность каждого канала задаётся значением в диапазоне [0,255]. Преобразование в градации серого осуществляется с использованием взвешенного суммирования интенсивностей каждого канала. Математически это выражается формулой:

$$I_{сер}(x, y) = w_R \cdot R(x, y) + w_G \cdot G(x, y) + w_B \cdot B(x, y),$$

где $I_{сер}(x, y)$ – интенсивность пикселя в градациях серого; R, G, B – значения интенсивности каналов RGB в пикселе (x, y); w_R, w_G, w_B – коэффициенты взвешивания.

Коэффициенты взвешивания определяются с учётом чувствительности человеческого глаза к разным длинам волн. Для стандартной модели w_R = 0,2989, w_G = 0,5870, w_B = 0,1140. Это позволяет учитывать большую чувствительность глаза к зелёному свету и меньшую к синему, преобразование в градации серого используется на начальном этапе обработки изображения после захвата камерой.

Однако с использованием фиксированного порога T, из-за колебаний в объемах розлива добиться стабильно высокой точности может быть затруднительно, особенно с учетом прозрачных материалов и жидкостей, поэтому применим динамическое пороговое значение, зависящее от локальных характеристик изображения.

Это выражается следующим образом:

$$T_{дин} = \frac{1}{n}\left(\sum_{(u,v)\in R} I(u,v)\right) + \alpha\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{(u,v)\in R}\left(I(u,v) - \frac{1}{n}\sum_{(u,v)\in R} I_{local}(x,y)\right)},$$

где n – количество пикселей в локальной области R; R – область с радиусом r_{local}центрированная на (x, y); α – коэффициент регулирующий вклад стандартного отклонения в итоговое пороговое значение $T_{дин}(x, y)$; его значение зависит от свойств изображения (контрастность, шумы) и определяется экспериментально по валидационному набору изображений. Обычно $\alpha \in [0.5, 2.0]$, где 0.50 усиливает роль средней интенсивности, а 2.0 делает систему более чувствительной к разбросу интенсивностей.

Для устранения ложных срабатываний, вызванных бликами или преломлением, используется анализ текстурного контраста:

$$C(x, y) = \nabla I(x, y) + \nabla^2 I(x, y),$$

где $\nabla I(x, y)$ – градиент интенсивности, (разность яркости пикселей в градациях серого [0,255]).

$\nabla^2 I(x, y)$, – лапласиан изображения, то есть второй порядок изменения интенсивности, его использование позволяет выделить резкие перепады в изображении (границы).

Участки с низким контрастом игнорируются, а области с высоким контрастом включаются в анализ.

Частные производные второго порядка приближённо вычисляются с использованием свёртки изображения с оператором Лапласа:

$$\nabla^2 I(x, y) \approx \sum_{i,j} I(x + i, y + j) \cdot K(i, j),$$

где $K(i, j)$ – ядро свёртки (обычно матрица 3×3).

Анализ текстурного контраста $C(x, y)$ используется для фильтрации областей с низким уровнем текстуры, таких как равномерно освещённые или размазанные области. Это позволяет исключить ложные срабатывания, вызванные бликами или преломлением света в бутылке. Таким образом итоговый порог интенсивности пикселей $T_{дин}(x, y)$ становится адаптивным и лучше соответствует локальным особенностям изображения, улучшая точность сегментации.

3. Результаты и моделирование. Основными элементами рассматриваемой системы контроля уровня жидкости в таре является камера высокого разрешения с частотой съёмки до 200 кадров в секунду фиксирует изображения бутылок, специализированный светодиодный осветительный прибор с направленным под откалиброванным углом светом, датчик расстояния и программируемое одноплатное устройство, связанное с системой удаленной передачи, хранения и обработки данные. Камера технического зрения работает в паре с источником света – специализированным светодиодным модулем, расположенной напротив камеры, создающей равномерное освещение. Это обеспечивает высокий контраст между прозрачными и заполненными частями бутылки. Камера синхронизируется с оптическим датчиком расстояния, который фиксирует положение бутылки в зоне контроля. Структура описанной системы представлена на рис. 1

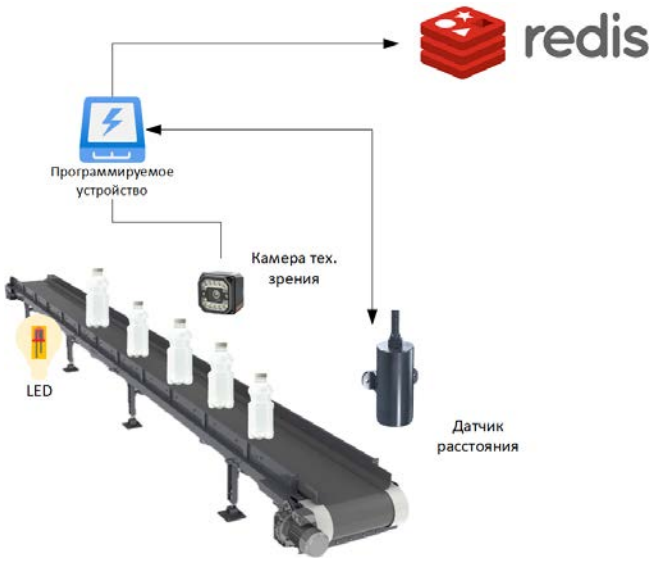


Рис. 1. Структурная схема системы контроля уровня жидкости

Камера, установленная для фиксации изображений объема заполнения тары, генерирует поток данных в реальном времени, которые затем передаются в вычислительный модуль. Данные захватываемых изображений обрабатываются через систему высокопроизводительного хранилища и обработки данных Redis для организации промежуточного обмена информацией между компонентами системы.

Система Redis представляет собой сетевое хранилище типа «ключ-значение», обладает минимальными задержками при записи и чтении данных, что делает ее подходящей для систем реального времени и в данном случае выполняет роль буфера обработки и передачи данных. Результаты анализа уровня жидкости (данные о высотах сегментированной области статусы заполнения тары: недолив, перелив, допустимый диапазон наполнения, количество измерений) для каждой тары записываются в виде структурированных данных, где ключ представляет уникальный идентификатор бутылки, а значение включает измеренные параметры, такие как высота жидкости и статус заполнения.

Рассмотрим основные этапы реализации предлагаемого алгоритма распознавания и контроля.

1) Первым этапом работы системы захват изображения и синхронизация с движением тары через зону контроля. Камера высокого разрешения синхронизирована с оптическим датчиком приближения, который определяет точное положение бутылки. Когда бутылка попадает в зону съёмки, датчик активирует камеру, которая фиксирует изображение в формате *RGB*.

2) После захвата изображение преобразуется из формата *RGB* в градации серого, что снижает объём данных и упрощает дальнейшую обработку. Затем применяется обрезка изображения для выделения области интереса, чтобы исключить элементы, не относящиеся к бутылке (например, фоновые конструкции конвейера). Этот шаг позволяет сократить вычислительные затраты и повысить точность анализа.

3) На этапе сегментации алгоритм выделяет области, соответствующие жидкости, путём сравнения значений пикселей с динамическим порогом. Пороговое значение определяется локально для каждой части изображения, что делает систему адаптивной к изменениям освещённости и свойств материала бутылки.

4) После сегментации производится морфологическая обработка изображения. Этот этап необходим для удаления шумов и восстановления связных областей, соответствующих уровню жидкости. Операции «открытие» и «закрытие» выполняются с использованием адаптивного структурного элемента, размер которого определяется автоматически на основе выделенных областей. Это позволяет учесть вариации формы и размера бутылки.

5) На основе бинарного изображения, полученного после морфологической обработки, выделяется связная область, соответствующая уровню жидкости. Для этого используется алгоритм анализа связанных компонентов, который идентифицирует каждую выделенную область и определяет её размеры. Основная область, соответствующая жидкости, выбирается на основании её положения и размера.

6) Высота сегментированной области в пикселях масштабируется в физическую величину, которая затем преобразуется в объём. Для расчёта объёма используется предварительно созданная калибровочная шкала. Этот этап завершает обработку данных, предоставляя информацию о состоянии бутылки (недолив, перелив или норма).

На рис. 2 показаны результаты работы алгоритма для распознавания уровней заполнения стеклянной тары.

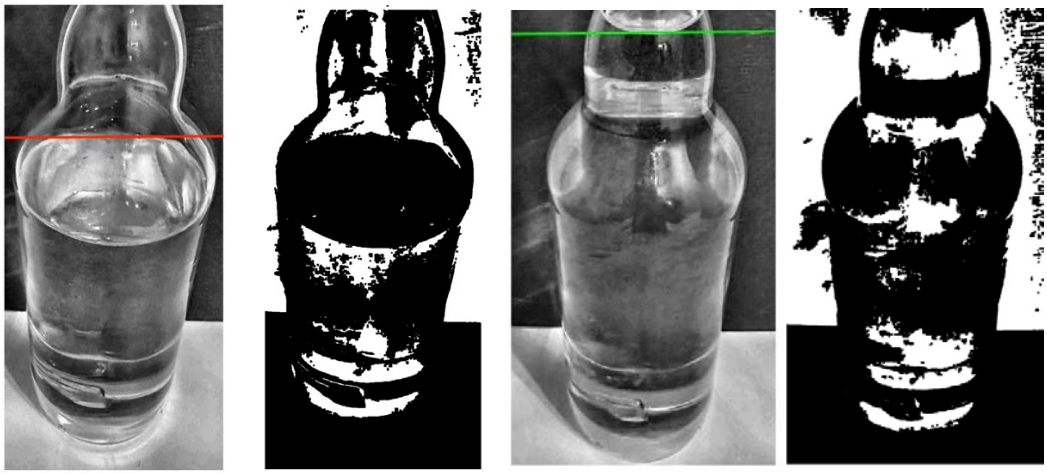
Для проверки точности алгоритма была проведена валидация на экспериментальных данных с использованием параметров полностью прозрачной стеклянной тары формы стандартной бутылки с максимальным объемом заполнения 450 мл, полной высотой от края до края – 255 мм, диаметром основания – 58 мм, максимальной высотой заполнения жидкости – 222 мм. Горлышко сужалось с диаметра 40мм до 25мм.



Рис. 2. Процесс определения уровня жидкости в таре

На рис. 3 представлены результаты распознавания жидкости по разработанному алгоритму для исследуемой тары, без детального вычисления объемов, но с отображением условно низкого и условно нормального уровня заполнения, который на данном этапе был задан как уровень заполнения горлышка тары.

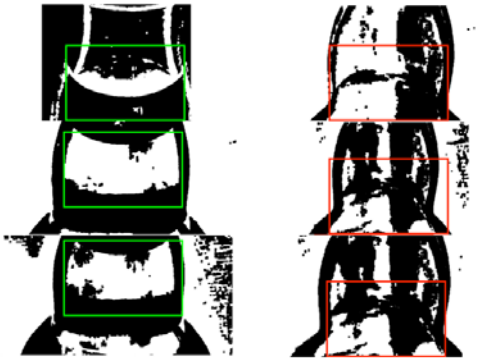
Изображения тары на рис. 3 (а) соответствует распознаванию прозрачной жидкости в бутылке с неполный уровнем заполнения, изображения на рис. 3 (б) показывают распознавание нормально заполненной тары. Область жидкости выделена на сегментированном изображении, что позволяет точно определить границу заполнения. Оба примера подтверждают эффективность использования адаптивного порогового значения и морфологических операций для обработки изображений бутылок с прозрачными жидкостями. Алгоритм успешно устраняет шумы и выделяет связные области, соответствующие уровню жидкости, что обеспечивает высокую точность при дальнейших вычислениях.



а *б*

Рис. 3. Результаты распознавания уровня заполнения стеклянной тары: (а) бутылка с неполным уровнем заполнения; (б) бутылка с нормальным уровнем заполнения

На рис. 4 представлены результаты сегментации и выделения уровней жидкости с использованием морфологических операций «открытие» и «закрытие», применяемые для устранения шумов и уточнения границ жидкости.



а *б*

Рис. 4. Фрагменты сегментированных областей уровня жидкости в стеклянной таре: (а) выделение границ уровня жидкости при нормальном заполнении; (б) выделение границ области жидкости для частичного заполнения с применением морфологических операций

На рис. 4 (а) показаны результаты для бутылки с нормальным уровнем заполнения. Зелёные рамки демонстрируют чётко выделенную область жидкости после применения алгоритма сегментации и морфологической фильтрации. Видно, что алгоритм устойчив к бликам и отражениям.

На рис. 4 (б) представлены этапы обработки для бутылки с частичным уровнем заполнения. Красные рамки показывают результаты поэтапного выделения области жидкости. На каждом этапе морфологическая обработка корректирует выделенные области, удаляя мелкие шумы и уточняя границы.

Определение объемов жидкости в статичной обстановке (одинаковые объемы, тара без движения) является неполным решением поставленной задачи, поэтому необходимо рассмотреть функциональные возможности алгоритма. Для этого были измерены параметры заполнения прозрачной жидкостью исследуемой тары, высоты жидкости при известных объемах из чего были сформированы валидационные и калибровочные параметры для разработанного алгоритма, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные для валидации разработанного алгоритма определения уровня жидкости в таре

V, мл	$h_{жид}$, мм	$H_{пикс}$, пиксель	$k_{пикс}$, мм/пикс	$r(h_{жид})$, мм	α
400	145	568,63	0,255	29	1,3
420	155	607,84		24,5	1,4
440	185	725,49		18	1,3
450	215	843,14		15,6	1,3

Всего было произведено по 15 изображений с уровнями заполнения для каждого, представленного в таблице 1 объема. Каждое значение высоты было усреднено на основе полученных изображений с одинаковым уровнем заполнения. На рис.5 представлены данные калибровочной шкалы, по аппроксимации, которая была выполнена по кусочно-линейной функции для четырёх сегментов: [145 – 155 мм], [155 – 185 мм], [185 – 195 мм], [195 – 215 мм]. Каждый сегмент соответствует отдельному диапазону объёмов, рассчитанному по валидационным данным с точностью ≈ 99,1%.

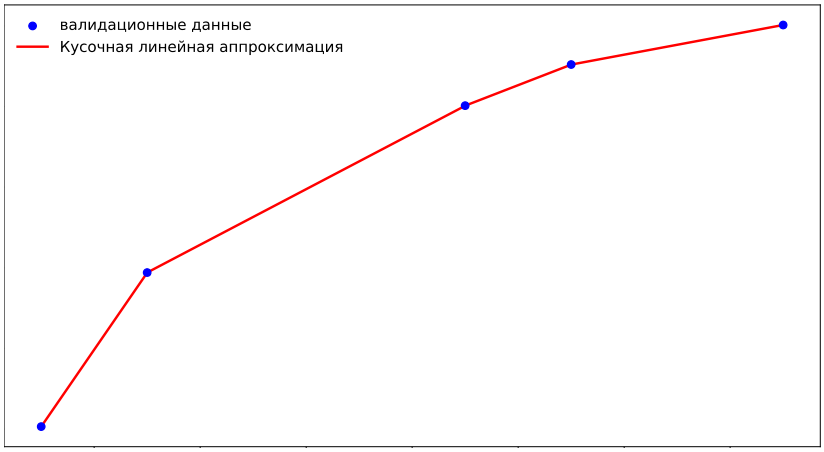


Рис. 5. Калибровочная шкала зависимости объема жидкости V от высоты жидкости в таре $h_{жид}$

Алгоритм также тестировался на движущихся бутылках, имитирующих реальные условия производственной линии. Тара перемещалась горизонтально перед камерой, также имитировался наклон 5° - 10° от нормали. Для каждого изображения высота сегментированной области $H_{пикс}$ сопоставлялась с результатами неподвижных снимков.

На рис. 6 представлены результаты сегментации изображений тары с наклонами жидкости, области интереса определены четко, несмотря на смещения, вызванные движением, что указывает на хорошие возможности алгоритма эффективно выполнять свои функции как для неподвижных, так и для движущихся объектов.



Рис. 6. Результаты сегментации изображений и определения области интереса алгоритмом при движении и наклоне тары

На рисунке 7 представлены результаты обработки изображений тары с разными уровнями объема жидкости. Рисунок отражает особенности сегментации и анализа для каждого из снимков, включая обнаружения недоливов, заданный нормальный уровень жидкости и потенциальный перелив, а также иллюстрирует применение разработанного подхода в условиях, приближенных к реальной производственной линии.

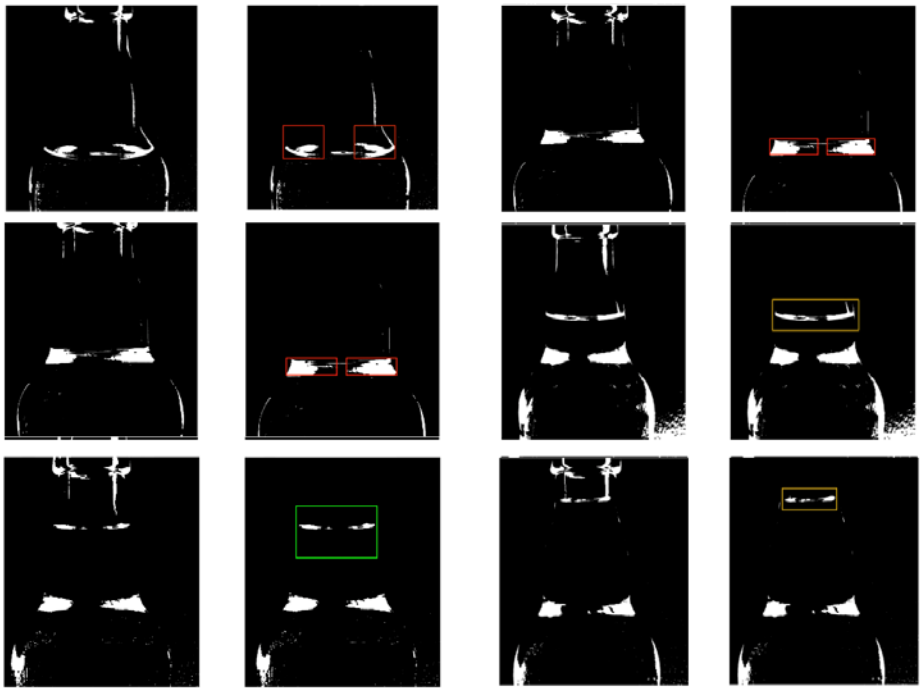


Рис. 7. Результаты сегментации изображений и определения отклонений от заданного диапазона значений объема (445 - 450 мл) в области интереса алгоритма

На полученных изображениях показаны результаты работы алгоритма в виде выделения областей интереса с определением соответствия уровня заполнения тары. Красным выделены участки, где был обнаружен недолив, что является критическим отклонением, особенно важным для предотвращения жалоб со стороны потребителей и минимизации рисков финансовых санкций для производителя. Зеленым определены области, которые указывают на диапазон, соответствующий нормальному уровню заполнения исходя из калибровочных параметров тары. Желтые рамки демонстрируют потенциальные случаи перелива, либо случаи распознавания наклона жидкости.

При наличии двойных зон выделения, алгоритм фокусируется на горизонтальных линиях в выделенных областях интереса. Такой подход не только упрощает алгоритм, но и позволяет минимизировать влияние внешних факторов, в виде отражения света, бликов и искажений, возникающих при движении тары, при этом, на рисунке 7 есть изображения, где видны по две пары горизонтальных бликов, в таком случае алгоритм ориентируется на верхний блик, учитывая параметры тары и условия освещенности. Таким образом, полученные данные подтверждают эффективность алгоритма как в условиях неподвижной тары, так и при моделировании реального производственного процесса с перемещением бутылок.

Заключение. Алгоритм, разработанный для анализа уровня жидкости, показал высокую точность и производительность в процессе тестирования. Этого возможно достичь за счёт представленных выражений в работе, включая сегментацию, морфологическую обработку, преобразование результатов в объёмы и использование адаптивного порода интенсивности пикселей в области интереса. При этом важно отметить, что добиться необходимой скорости определения объемов жидкости в таре при работе выкоэффективных роботизированных линий розлива с данным алгоритмов возможно только при использовании высокоскоростной камеры с разрешением, которое позволит фиксировать изображения тары в движении, сохраняя необходимую детализацию.

Валидация алгоритма проводилась в условиях, имитирующих реальную линию розлива, с контролем движения бутылок и моделированием наклонов до 10°. Результаты показали, что даже при динамических условиях алгоритм сохраняет точность классификации уровня жидкости, где допустимая ошибка не превышает 1-2%, что достигается благодаря сегментации горизонтальных линий уровня жидкости и их анализу в выделенных областях интереса, минимизируя влияние наклонов тары и динамических искажений.

При этом предлагаемое использование системы Redis в качестве промежуточного хранилища данных позволяет синхронизировать работу камеры, сенсоров и вычислительного модуля в режиме реального времени. Такой подход значительно сокращает задержки, обеспечивая беспрерывность процесса контроля.

Алгоритм может интегрирован в систему калибровки и визуализации данных и этапе настройки необходимо задавать ключевые параметры, такие

как выбор контрольных точек для сегментации, определение областей интереса, параметры камеры, тары и т.д.

Список литературы

1. Хамед Эраки Мохамед Тахер, Благовещенский И. Г., Благовещенский В. Г., Зубов Д. В. Контроль качества розлива и маркировки пищевых продуктов с использованием интеллектуальных технологий // Health, Food & Biotechnology. 2020. Т. 2, № 1. С. 112–127. DOI: 10.36107/hfb.2020.i1.s295.

2. Farhangi O., Sheidaee E., Kisalaei A. Machine Vision for Detecting Defects in Liquid Bottles: An Industrial Application for Food and Packaging Sector // Cloud Computing and Data Science. 2024. Vol. 5. P. 242–254. DOI: 10.37256/ccds.5220244756.

3. Мосин В. Г., Козловский В. Н., Антипова О. И., Гафаров Р. Р. Инструменты управления качеством. Поиск калибровочных границ методами машинного обучения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 10–15. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-10-11.

4. Зассеев А. А., Хасцаев Б. Д. Основные преимущества и недостатки автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами // Национальная ассоциация ученых. 2022. № 84-1. С. 50–51.

5. Власов Д. В., Мясников А. В., Аксенов Д. А., Сидоров В. Г. Системы машинного зрения для автоматического управления производственными процессами // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2021. Т. 2. С. 14–16.

6. Akhavan J., Mahmoud Y., Xu K., Lyu J., Manoochehri S. TDIP: Tunable Deep Image Processing, a Real Time Melt Pool Monitoring Solution // 2023 Congress in Computer Science, Computer Engineering, & Applied Computing (CSCE). Las Vegas, NV, USA, 2023. P. 1899–1908. DOI: 10.1109/CSCE60160.2023.00314.

7. Rožanec J. M., Trajkova E., Dam P., Fortuna B., Mladenić D. Streaming Machine Learning and Online Active Learning for Automated Visual Inspection // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, Issue 2. P. 277–282. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.04.206.

8. Беляев А. А., Михайлов Г. И. Современные средства обработки изображений в режиме реального времени // Современные инновации. 2016. № 11(13). С. 30–31.

9. Шиболденков В. А., Панова Д. А. Анализ данных производственного процесса в реальном времени: инновационная аналитическая платформа с использованием технологии искусственного интеллекта компании Sight Machine Inc // Креативная экономика. 2020. Т. 14, № 12. С. 3465–3478.

10. Мекшун А. Н., Мекшун Ю. Н., Мекшун А. Ю. Технологии мониторинга техники и оборудования в промышленном производстве // Вестник Курганской ГСХА. 2021. № 2(38). С. 62–68.

11. Ширяев Б. В., Ющенко А. Ю., Безрук А. В. Алгоритм автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем с использованием искусственных нейронных сетей // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2019. Т. 22, № 2. С. 72–76.

12. Борминский С. А., Солнцева А. В., Скворцов Б. В. Метод оптоэлектронного контроля объема жидкости в резервуаре // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 4. С. 552–559. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-552-559.

13. Ефимов А. И., Муратов Е. Р., Никифоров М. Б. Автоматизированная система исследования алгоритмов обработки изображений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 113–117. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-113-114.

14. Назаров Н. Б., Набродова И. Н. Методы обработки изображений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 59–60. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-59-60.

15. Дурдымырадов М., Чарлыев С., Гадамова Дж. Системы автоматизированного контроля качества на производстве // Вестник науки. 2024. Т. 3, № 11(80). С. 957–960.

16. Онищенко С. В., Козловский А. В., Мельник Э. В. Разработка бесконтактной системы измерения геометрических параметров объектов на изображении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 177–182.

Квас Евгений Станиславович, аспирант, старший преподаватель, E.kvas@guap.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Бобрышов Алексей Павлович, аспирант, ассистент, ap.bobryshov@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Кузьменко Владимир Павлович, канд. техн. наук, доцент, mr.konnny@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Солёный Сергей Валентинович канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, ssv@guap.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

ADAPTIVE ALGORITHM FOR DETERMINING LIQUID LEVELS IN CONTAINERS ON ROBOTIC BOTTLING LINES

E.S. Kvas, A.P. Bobryshov, V.P. Kuzmenko, S.V. Solyony

This study examines the problem of automated liquid level control in transparent glass containers for high-performance robotic filling lines, where dynamic conditions—such as container movement, tilts, flow velocity, and blockages—complicate volume measurement during overfill and underfill detection. The objective of the research is to develop an algorithm that

ensures adequate real-time control of underfilling and overfilling in the container, taking into account the dynamic operating conditions of the robotic filling line. The algorithm is based on an adaptive segmentation method and employs a dynamic pixel intensity threshold calculation that considers textural contrasts. The algorithm's performance and accuracy were verified using a fully transparent bottle-shaped container with a maximum capacity of 450 ml under static conditions, as well as under simulated container motion accounting for possible liquid tilts of up to 10°. The novelty of the algorithm lies in its adaptability through the use of a dynamic pixel intensity threshold that depends on the local conditions of the filling line. Verification results demonstrated that the algorithm correctly identified overfill, underfill, and liquid tilt in up to 99% of cases, indicating its potential applicability in production environments.

Key words: machine vision systems, quality control of robotic bottling lines, adaptive image segmentation, dynamic pixel intensity threshold, liquid level control.

Kvas Evgeny Stanislavovich, postgraduate, senior lecturer, E.kvas@guap.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP),

Bobryshev Alexey Pavlovich, postgraduate, assistant, ap.bobryshov@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP),

Kuzmenko Vladimir Pavlovich, candidate of technical sciences, docent, mr.konnny@gmail.com, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP),

Soleny Sergey Valentinovich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, ssv@guap.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP)

УДК 658.518.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-178-179

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ТИПА ОРГАНИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.А. Гореликов, Е. В. Плахотникова, С. И. Соловьев

В статье представлена методика идентификации типа организационной модели предприятия для адаптации системы бережливого производства в условиях реального производства. Сформулированы основные положения авторского подхода. Предложены механизмы сбора и обработки информации, позволяющей установить принадлежность предприятий к одной и более типам организационной модели. Разработано математическое описание для реализации методики и выявления «оттенков» базовых организационных моделей Ф. Лалу. Применение методики позволяет учесть особенности предприятий и сформировать номенклатуру методов бережливого производства с перспективой их долгосрочной эффективности.

Ключевые слова: бережливое производство, организационная модель предприятия, модели Ф. Лалу, теория глубинных знаний Э. Деминга.

В настоящее время все большую популярность приобретает тенденция внедрения на предприятиях методов и инструментов бережливого производства (БП). Система методов БП позволяет сократить трудозатраты

и сроки освоения новой продукции, снизить себестоимость при сохранении требуемого качества, изменить культуру управления предприятием и систему ценностей сотрудников, повысить эффективность и результативность процессов и т.д. [1].

Существенную поддержку в данном направлении оказывают национальные проекты [2], ориентированные на интеграцию уже сформированной системы знаний в области БП в систему управления производством предприятия.

Первоочередными задачами при внедрении БП является исследование материальных и нематериальных потерь предприятия, формирование представления о его целях и предварительная оценка эффективности методов БП. Решение указанных задач, позволяет осуществить подбор методов БП обеспечивающих достижение поставленных целей и критериев эффективности уже на первых этапах внедрения. Далее развитие системы БП зависит от многих факторов: вовлеченность в процесс руководства предприятия; мотивация сотрудников; культура организации и т.д. Каждый из приведенных факторов определяется типом организационной модели предприятия, от которого зависит возможность и способность предприятия не только внедрить, но и принять методы БП, обеспечивая долгосрочную эффективность системы.

В настоящее время вопросу идентификации типа организационной модели предприятия при выборе методов БП уделяется недостаточное внимание, что и приводит к неопределенности конечного результата.

В практической деятельности человека часто возникает необходимость разделить объекты по тем или иным признакам или свойствам. В теории множеств такая задача решается следующим образом. Сначала выдвигается признак, по которому объекты, составляющие множество, могут отличаться друг от друга. Далее все объекты по этому признаку разделяются на два и более подмножеств, не пересекающихся между собой. Например, по среде передвижения транспорт делится на воздушный, наземный, надводный и подводный. И таких примеров можно привести множество.

Однако такой подход не всегда позволяет исчерпывающе классифицировать объекты для решения практических задач. Дело в том, что при отнесении объекта к тому или иному виду приходится учитывать несколько, а не один какой-либо признак. В этом случае классификация становится несколько размытой, поскольку полученные подмножества объектов начинают пересекаться между собой. Это означает, что элементы различных подмножеств будут иметь общие друг с другом черты (соответствия признакам). Например, тот же транспорт может быть воздушным грузовым и воздушным пассажирским, равно, как и другие его виды.

Именно такая задача возникает при идентификации типа организационной модели предприятия. Для объективного ее решения предлагается следующее:

1. Принять, что предприятия, относящиеся к разным типам по какому-либо одному признаку, по другим признакам могут иметь сходство

(общие черты);

2. Для каждого типа организационной модели предприятий устанавливается свой перечень требований, которому он должен соответствовать и приоритетность этих требований. Часто на практике различные виды предприятий отличаются не столько различным содержанием этих требований, сколько их приоритетностью;

3. Для каждого типа организационной модели, на которые классифицируются предприятия, выявить свой набор соответствий признакам, лежащим в основе этой классификации;

4. Выявить количественные приоритеты (частоту повторяемости) того или иного соответствия признакам;

5. Установить тип организационной модели предприятия по самому приоритетному соответствию тому или иному признаку;

6. В случае равенства приоритетов соответствий при определении вида предприятия учитывать следующее по приоритетности (частоте повторяемости) соответствие;

7. Степень «чистоты» соответствия предприятия тому или иному типу организационной модели определить степенью рассеяния приоритетов, которое количественно можно оценить дисперсией значений приоритетности признаков.

Для практической реализации задачи идентификации типа организационной модели разработана методика, которая включает три ключевых этапа:

1. Сбор данных, путем проведения анкетирования;

2. Обработку результатов анкетирования;

3. Идентификацию типа организационной моделей для предприятий.

В качестве примера реализации предложенной методики рассмотрим задачу идентификации типа организационной модели предприятия в соответствии с цветовыми моделями Ф. Лалу.

В качестве базовых моделей выбраны три наиболее характерные для современных предприятий организационных моделей: оранжевая, зеленая и бирюзовая [3].

Классификационные признаки организационных моделей Ф. Лалу представлены в таблице (табл. 1).

Таблица 1

Классификационные признаки типовых моделей Ф. Лалу

Оранжевая модель	**Зеленая модель**	**Бирюзовая модель**
Концепция		
стандартизованный алгоритм действий, контроль с помощью правил и инструкций	стратегия определяется корпоративными ценностями	изучение, развитие и принятие опыта
Базовые принципы		
новаторство, ответственность, меритократия	расширение полномочий, организационная культура, увеличение числа заинтересованных лиц	эволюция, самоуправление, целостность личности
Принятие решений		
централизованное	децентрализованное	децентрализованное

Оранжевая модель	Зеленая модель	Бирюзовая модель
Стратегия		
разрабатывается высшим руководством	следует из ценностей	формируется командой
Организационная структура		
иерархическая	адаптивная	адаптивная
Подход к изменениям		
пошаговый	только в пределах парадигмы	непрерывный процесс
Менеджмент		
управление по целям	HR-менеджмент	взаимодействие равноправных коллег

Для выполнения первого этапа представленной методики разработана анкета, включающая 16 закрытых вопросов. Вопросы «закрывают» выбранные организационные модели списком альтернативных ответов, составленных в соответствии с характеристиками моделей (см. табл. 1). При составлении вопросов были учтены четыре основных аспекта: убеждения и мировоззренческие установки; поведение сотрудников; организационная культура; организационная структура, процессы управления, методы работы. Каждому цветовому коду типа организационных моделей при разработке анкеты был присвоен соответствующий цифровой код: 1 — оранжевая организация, 2 — зеленая организация; 3 — бирюзовая организация. Фрагмент анкеты представлен в таблице (табл. 2).

Таблица 2

Фрагмент анкеты для идентификации типа организационной модели по цветовому коду

Вопрос № 1. Что Вас больше замотивирует выполнить сложное и трудоемкое задание?		
Ранг ответа	**Цифровой код**	**Варианты ответа**
	1	Дополнительное материальное поощрение.
	2	Возможность сделать интересную работу.
	3	Важность задания для достижения целей общества.

При проведении анкетирование производится ранжирование ответов. Ранг 1 присваивают наиболее подходящему ответу, ранг цифру 2 — чуть менее подходящему ответу, ранг 3 — наименее подходящему ответу.

Массив полученной информации, по завершению анкетирования фиксируется в форме, соответствующей таблице 3, где в столбце, соответствующем номеру вопроса, напротив каждого варианта ответа указывается тот ранг, который был присвоен при анкетировании.

Таблица 3

Пример сводной таблицы результатов анкетирования

Цифровой код	Номер вопроса																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Сумма рангов *l*-го цифрового кода
1	1	2	3	2	1	2	3	2	1	2	3	2	1	3	2	3	33
2	2	1	2	1	3	1	2	1	3	1	2	1	3	1	3	1	28
3	3	3	1	3	2	3	1	3	2	3	1	3	2	2	1	2	35

Обработка полученных результатов (см. табл. 3) осуществляется путем суммирования присвоенных рангов по строке:

$$C_l = \sum_{p=1}^{n} R_{ilp}, \quad (1)$$

где C_l — сумма рангов l-го цифрового кода; l — порядковый номер цветового кода, $l = 1…3$; i — номер ранга, $i = 1…3$; R_i — значение ранга или его значимость, $R_i = i$; p — порядковый номер вопроса анкете, $p = 1…n$; n — количество вопросов в анкете.

Наименьшее значение суммы рангов будет соответствовать цветовому коду организационной модели.

Определить степень близости («чистоты») конкретных вариантов решения по отнесению предприятия к тому или иному цветовому коду (стабильность ответов на вопросы анкеты) можно с помощью дисперсий значений рангов, полученных при анкетировании:

$$D_l = \frac{\sum_{p=1}^{n}(R_{ilp} - \bar{R}_l)^2}{n-1}, \quad (2)$$

где D_l — дисперсия рангов l-го цифрового кода; $\bar{R}_l$ — среднее арифметическое значение рангов l-го цифрового кода.

Значение дисперсии будет характеризовать степень единства ответов респондента на вопросы о принадлежности предприятия к одному из базовых типов организационных моделей.

Дисперсия рангов, когда все ответы одинаковы и представлены единицей, обращается в ноль, что означает абсолютную уверенность в принятом решении, а незначительное отклонение дисперсии от нуля говорит о том, что предприятие имеет небольшое пересечение свойств с предприятиями другого типа.

При большом значении дисперсии, следует говорить о предприятиях смешанного типа, сочетающих характерные черты как минимум двух типов базовых моделей, например: бирюзово-зеленых, оранжево-бирюзовых и т.д.

Наиболее объективно идентифицировать цветовую модель в подобном случае, т.е. учесть ее оттенки, можно будет путем введения весовых коэффициентов для каждого приоритета, что позволит оценить степень важности каждого из приоритетов при принятии решения об отнесении предприятия к тому или иному организационной.

Для решения такой задачи, целесообразно использовать весовые коэффициенты, принятые в соответствие с геометрической прогрессией со знаменателем k и равные в сумме единице:

$$a + \frac{a}{k} + \frac{a}{k^2} = 1 \quad (3)$$

где a — весовой коэффициент первого приоритета; $\frac{a}{k}$ — весовой коэффициент второго приоритета; $\frac{a}{k^2}$ — весовой коэффициент третьего приоритета.

Чтобы сохранить ведущую роль первого приоритета целесообразно его весовой коэффициент (a) задавать равным не менее 0,5.

Расчет знаменателя k производится по формуле, полученной из решения приведенного квадратного уравнения (3):

$$k = \left(-\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \left(1 - \frac{1}{a}\right)}\right)^{-1}. \quad (4)$$

За корень уравнения принимается тот, который содержит положительный радикал.

В качестве примера приведем результаты обработки анкетирования, представленные в таблице 3.

В соответствии с полученным результатов (см. табл.3) наименьшая сумма рангов соответствует цифровому коду 2 — зеленая модель организации.

Значение дисперсии в первой строке, рассчитанной по формуле (1) соответствует значению 56,86; во второй строке — 41,22, в третьей строке — 63,98. Принимая весовой коэффициент первого приоритета (a) равным 0,8, произведем расчет весовых коэффициентов для второго и третьего приоритетов, предварительно определив знаменатель прогрессии k по формуле 4. Его значение для рассматриваемого примера составит: k= 4,8284271.

Весовые коэффициенты второго и третьего приоритетов будут соответственно равны значениям: 0,166 и 0,034.

Для удобства дальнейших вычислений сведем в единую таблицу исходные данные для расчета относительной весомости цветовых моделей в рассматриваемом примере (табл. 4).

Таблица 4

Расчетные данные для оценки весовой значимости различных типов цветовых моделей в организации смешанного типа

Цифровой код	Количество предпочтений по каждому приоритету			Средние взвешенные значения ранга цветовой модели	Нормированные значения рангов цветовой модели
	1-ый приоритет (N_1)	2-ой приоритет (N_2)	3-ий приоритет (N_3)		
1	4	7	5	4,531	0,283
2	8	4	4	7,200	0,450
3	4	5	7	4,269	0,267
Весовой коэффициент приоритета	a = 0,800	$\frac{a}{k} = 0{,}166$	$\frac{a}{k^2} = 0{,}034$	Σ=16	Σ=1

Расчет среднего взвешенного арифметического значения ранга цветовой модели, соответствующей цифровому коду (см. табл. 4), производится по формуле:

$$Q_l = N_1 \cdot a + N_2 \cdot \frac{a}{k} + N_3 \cdot \frac{a}{k^2}, \quad (5)$$

где Q_l — среднее взвешенное арифметическое значение ранга цветовой модели организации; l — порядковый номер цветового кода, $l = 1…3$; N_1, N_2, N_3 — количество предпочтений по каждому приоритету.

Расчет нормированных значений рангов цветовой модели (см. табл. 4) произведен по формуле:

$$Q_l^{\text{н}} = \frac{Q_l}{\sum_{i=1}^{l} Q_l}. \quad (6)$$

Величина нормированных значений рангов цветовой модели определяет долю присутствия в модели предприятия признаков и характеристик других базовых типовых организационных моделей. В рассматриваемом случае можно прийти к следующему выводу — предприятие соответствует преимущественно зеленому ($Q_2^{\text{н}} = 0{,}450$) коду (организационному типу 2),

но при этом в довольно близком между собой соотношении имеет черты (оттенки) оранжевого и бирюзового кодов (организационных типов 1 и 3).

«Выявление оттенков» в организационной модели предприятия позволит определить наилучший вариант сочетания методов БП для конкретного предприятия.

Так, например, оранжевым организациям, работающим благодаря четко выстроенным устойчивым процессам, в первую очередь необходим набор методов для более детального понимания теории вариабельности. Зеленым организациям, ориентированным на продвижение духовных ценностей, больше подойдут методы, направленные на знание и учет психологии работников.

Но следует понимать, что в данном случае мы говорим именно о приоритетности методов. Общая совокупность методов БП должна закрывать все основные аспекты, заложенные в основу теории глубинных знаний Э. Деминга [4], которая направлена на рациональное сочетание четырех основных компонентов: понимание системы, понимание теории вариабельности; понимание основ теории познания и знание психологии.

Подводя общий итог, следует сделать вывод. Для обеспечения долгосрочной эффективности системы БП в условиях конкретного предприятия на ряду с идентификаций целей для выбора номенклатуры методов БП необходима и идентификация типа организационной модели предприятия. Знание типа организационной модели позволит осуществить подбор методов с учетом способности предприятий принять методы БП и беспрепятственно интегрировать их в систему управления производством.

Методика идентификация типа организационной модели, по мнению авторов, является универсальной и с незначительными изменениями может быть адаптирована к любой базовой номенклатуре типовых организационных моделей.

Список литературы

1. Птускин А.С. Методика расчета показателей эффективности проекта внедрения инструментов бережливого производства / А.С. Птускин, В. Ю. Анцев, Н.А. Витчук // Известия тульского государственного университета. Экономические и юридические науки, 2014. №5-1. С. 253-266.

2. Паспорт национального проекта (программы) «Производительность труда и поддержка занятости» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 № 16) // СПК «КонсультантПлюс».

3. Лалу Ф. Открывая организации будущего: перевод с английского. Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 524 с.

4. Гореликов А.А. Обоснованная теория глубоких знаний: целенаправленный переход от контроля к прогнозированию // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 12. С. 466-469.

Гореликов Александр Анатольевич, аспирант, faibolung@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Плахотникова Елена Владимировна, д-р техн. наук, профессор,

Соловьев Сергей Игоревич, канд. техн. наук, доцент, sergei59@bk.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METHODOLOGY FOR IDENTIFYING THE TYPE OF ORGANIZATIONAL MODEL OFAN ENTERPRISE FOR ADAPTING A LEAN PRODUCTION SYSTEM

A.A. Gorelikov, E.V. Plakhotnikova, S.I. Soloviev

The article presents a methodology for identifying the type of organizational model of an enterprise for adapting a lean production system in real production conditions. The main provisions of the author's approach are formulated. The mechanisms of collecting and processing information are proposed, which makes it possible to establish the affiliation of enterprises to one or more types of organizational model. A mathematical description has been developed to implement the methodology and identify the "shades" of F. Laloux's basic organizational models. The application of the methodology makes it possible to take into account the specifics of enterprises and form a nomenclature of lean production methods with the prospect of their long-term effectiveness.

Key words: lean manufacturing, organizational model of the enterprise, F. models. Lalu, the theory of deep knowledge by E. Deming.

Gorelikov Alexander Anatolyevich, postgraduate, faibolung@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Plakhotnikova Elena Vladimirovna, doctor of technical sciences, professor, e_plahotnikova@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Solovyov Sergey Igorevich, candidate of technical sciences, docent, sergei59@bk.ru, Tula, Russia, Tula State University

УДК 65.018
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-186-187

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЕКТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА НА ОСНОВЕ СТО ГАЗПРОМ 9001-2018

А.А. Ахрамович, Е.В. Борисова, П.Ю. Архипов, С.А. Одиноков

В статье рассмотрены вопросы развития системы менеджмента качества на предприятии путем внедрения отраслевых стандартов. Проведен анализ особенностей системы на основе стандарта СТО Газпром 9001-2018. Рассмотрены возможности использования подходов, принятых в управлении проектами применительно к развитию системы менеджмента качества. Проведена оценка трудоемкости работ для планирования и внедрения отраслевой системы в виде спринтов.

Ключевые слова: система менеджмента качества, отраслевая система, СТО Газпром, управление проектами, спринты, трудоемкость.

Современная практика организационного развития предприятия предполагает первоначальное внедрение системы менеджмента качества (СМК), основанной на требованиях стандарта ГОСТ Р ИСО 9001. Это объясняется целым рядом причин, среди которых и необходимость обеспечить соответствующее качество продукции, и сравнительная простота стандарта с точки зрения трудоемкости внедрения, и требование заказчика иметь именно такой сертификат, и многое другое. Однако завершив построение данной системы и получив при этом те преимущества, которые заложены в системном подходе к менеджменту, руководство предприятия часто начинает задумываться о расширении области менеджмента. Как правило, речь идет о повышении экологической эффективности, улучшении деятельности в области охраны труда и безопасности производства, информационной безопасности и т.д. В этом случае возможно дополнительно построение соответствующей системы менеджмента или, что значительно более эффективно, аддитивное построение интегрированной системы менеджмента. В этом случае СМК играет роль базовой системы и ряд выполненных требований может уже соответствовать добавляемой системе. Это объясняется заложенной в стандартах способностью к интеграции. Речь идет как о структуре стандартов, так и об отдельных требованиях, например, внутренний аудит, среда предприятия, документированная информация и т.д. Эти требования в разных системах имеют общие подходы, что позволяет значительно снизить трудоемкость, сэкономить на внедрении, и что особенно важно, понизить эмоциональные нагрузки на персонал от использования новых элементов системы.

Кроме такого развития системы, развития «вширь», когда принимается решение о регулировании дополнительных областей менеджмента, существует развитие «вглубь», когда происходит переход к более строгому и подробному менеджменту. Как правило, это происходит при внедрении отраслевой системы менеджмента, в основе которой лежит также СМК, основанная на стандарте ГОСТ Р ИСО 9001. Такой подход имеет меньше

рисков, чем построение сразу отраслевой системы, хотя и вариант, когда на предприятии сразу внедряется более сложная система, также возможен, особенно, когда есть требование заказчика или рынка.

Одной из первых появившихся отраслевых систем можно назвать систему, основанную на требованиях QS9000, предложенную американскими компаниями для обеспечения качества в автомобильной промышленности. За двадцать лет данный стандарт подвергся большим изменениям, но современный вариант по-прежнему определяет структуру и содержание СМК в этой отрасли. Подобные стандарты действуют практически в каждой отрасли промышленности.

Примером яркой и довольно заметной отраслевой системы менеджмента качества в Российской Федерации является разработка ПАО «Газпром» - стандарт СТО Газпром 9001-2018, основанный на требованиях ГОСТ Р ИСО 9001 и дополняющий их. Настоящий стандарт применяется как в самой компании ПАО «Газпром», так и во всех ее дочерних и подрядных организациях.

В целях обеспечения контроля соответствия корпоративным требованиям дочерних и подрядных организаций в 2016 году ПАО «Газпром» была зарегистрирована Система добровольной сертификации ИНТЕРГАЗСЕРТ (далее СДС ИНТЕРГАЗСЕРТ), в рамках которой в том числе осуществляется аккредитация органов по сертификации на право сертификации организаций на соответствие требованиям СТО Газпром 9001-2018. Также в рамках СДС ИНТЕРГАЗСЕРТ осуществляется добровольное подтверждение соответствия в форме добровольной сертификации продукции, процессов проектирования, производства, строительно-монтажных и пусконаладочных работ, работ по эксплуатации, хранению, перевозке, реализации и утилизации продукции.

Стандарт СТО Газпром 9001-2018 существенно расширяет и дополняет требования стандарта ГОСТ Р ИСО 9001. Примерами подобных специфических требований служат следующие положения:

обязательное наличие структурного подразделения, координирующего деятельность по разработке, внедрению и поддержанию, системы менеджмента качества организации (п. 5.3.2);

обязательное наличие представителя высшего руководства в области качества (п. 5.3.3);

обязательное наличие такого документа как бизнес-план (п. 6.2.4);

наличие требований к мотивации персонала (п. 7.1.2.2);

наличие требований к подтверждению квалификации для особо ответственных процессов (п. 7.2.3);

наличие требований к разработке и управлению планами качества (п.8.1.3);

наличие требований к специальным характеристикам продукции и особо ответственным процессам (п.8.2.2.2).

Как видно из укрупненного списка выше СТО Газпром 9001 не только возвращает часть требований ГОСТ ISO 9001-2011, а также

дополняет их конкретными требованиями к наличию тех или иных документов и прочих средств управления. Настоящий подход с одной стороны помогает упростить процесс внедрения систем менеджмента, с другой – лишает творческой свободы интерпретации выполнения тех или иных требований для организаций.

Учитывая преемственность СТО Газпром 9001-2018 при сертификации системы менеджмента на соответствие требованиям настоящего стандарта той или иной организации орган по сертификации выдает на ряду с сертификатом соответствия СТО Газпром 9001 также сертификат соответствия ГОСТ Р ИСО 9001.

Внедрение любой системы менеджмента требует выполнения типовых шагов: вовлечение высшего руководства, идентификация основных процессов, внедрение и управление такими процессами, выполнение требований стандарта, управление системой, сертификация системы. В некоторых областях менеджмента могут также присутствовать достаточно серьезные специфические особенности, учитываемые при разработке, например, для системы экологического менеджмента выполняется работа по определению экологических аспектов и описанию сопутствующих рисков. Однако в любом случае, планирование и создание системы носит ярко выраженный проектный характер. И также, как в любом проекте, следует выполнять некоторые правила и проходить заданные этапы. Во-первых, планирование проекта, включая определение проекта, декомпозицию и планирование отдельных работ, разработку план-графика. Во-вторых, выполнение работ по проекту, в том числе руководство проектом, управление информационными коммуникациями и т.д. Особую роль играет при выполнении работ осуществление контроля проекта, реализация которого заключается в ответе на такие вопросы, как укладываемся ли мы в бюджет, выполняем ли установленные сроки, появились ли те или иные отклонения и т.д. Но в целом успех или неудача построения системы менеджмента как проекта оценивается главным образом вовремя пройденной сертификацией и полученным сертификатом.

Подобная модель построения системы менеджмента соответствует предиктивному подходу в реализации проекта, характеризуемого поставкой бизнес-ценности в конце проекта, сосредоточением на выполнении запланированного хода работ и обеспечении эффективности задействованных подразделений. Особенно ярко это видно в случае подключения к работе профессиональных консультантов, заинтересованных в строгом выполнении работ при минимальных отклонениях от запланированной последовательности действий. Основное преимущество заключается в наличии положительного опыта у консультанта, практически проверенных и запланированных вновь мероприятий и действий, наличия готовых ответов на возникающие вопросы, и в итоге, снижения неопределенности и рисков.

В случае же наличия сертифицированной СМК на основе ГОСТ Р ИСО 9001, создание интегрированной системы или расширение до отраслевой системы менеджмента, создается особая ситуация – часть требований уже выполнена и проверена, система действует. Но часть новых

дополнительных требований отсутствует, частично или полностью. Следовательно, требуется разработка способа осуществления этих требований, реализация необходимых для этого мероприятий, проверка и подтверждение реализации. По сути, требуется достройка системы до необходимого уровня требований без нарушения работоспособности уже действующей системы.

При выполнении отдельных требований можно воспользоваться итеративным подходом в управлении проектами – последовательно внедрять в систему отдельные из них и последовательно проводить контроль результатов с целью подтверждения завершения данного этапа или внесения корректирующих действий для более правильного или точного исполнения в следующем цикле. Однако в этом случае можно получить достаточно неритмичное построение системы – часть требований можно внедрить быстро, а над некоторыми потратить достаточно времени, что может привести к сбоям в работе команды исполнителей.

Более интересно, с точки зрения организации работы по построению системы, будет использование инкрементных циклов, применяемых также в управлении проектами. Здесь предполагается разбить всю работу на относительно короткие циклы-спринты, в течении которых команда должна получить результат, готовый для использования. В нашем случае это будет некоторое дополнительное требование стандарта, выполненное и внедренное на предприятии. В этом случае первой задачей при развитии системы будет оценка трудоемкости всех работ и разделение их на равные части для планирования будущих спринтов.

Оценка трудоемкости задач для внедрения систем менеджмента в рамках инкрементного и итеративного подхода или их объединения, является очень важной частью формирования конечного перечня задач, так как на основе настоящей оценки производится конечное формирование содержания задач в спринте. Для равномерного и предсказуемого выполнения работ в спринтах все задачи в них группируются таким образом, чтобы выполнение нескольких спринтов занимало примерно сопоставимое количество времени, это может быть две недели. Следовательно, серия спринтов может быть выстроена таким образом, что в двух смежных спринтах следующих один за другим – в одном может выполняться одна глобальная трудоемкая задача, например, разработка и управление документированной информацией интегрированной системы менеджмента, а в другом, смежном спринте – серия менее глобальных изменений и дополнений, например, размещение в общем доступе для всех заинтересованных сторон политики в области интегрированной системы менеджмента, или корректировка критериев результативности одного из процессов.

В случае, когда внедрение системы менеджмента итеративным или инкрементным подходом является новой задачей, и команда не понимает относительно чего оценивать новые задачи, необходимо собрать несколько уже реализованных хорошо всем знакомых или типовых задач и оценить их сложность относительно друг друга. Можно использовать этот опыт для оценки новых задач.

Оценка трудоемкости задач может осуществляется по следующим критериям:

1. Наличие необходимости создания документированной процедуры:

– наличие документированной процедуры обязательно;

– наличие документированной процедуры желательно, но можно обойтись упрощенным вариантом реализации требования без формирования документированной процедуры (в дальнейшем можно разработать документированную процедуру при низкой результативности уже внедренных мер соответствия требованиям стандарта);

– наличие документированной процедуры не требуется.

2. Наличие необходимости ознакомления/обучения персонала по результатам внедрения требования:

– обучение обязательно, частично или полностью персонал обязан в точность следовать результатам внедрения требования;

– следует ознакомить персонал с результатами внедрения требования;

– результаты внедрения требования не обязательны к обучению и/или ознакомлению.

3. Область распространения внедряемого требования на персонал организации:

– требование распространяется на весь персонал организации;

– требование распространяется на определенные структурные подразделения или должностных лиц и не несет в себе всеобъемлющий характер;

– требование распространяется на одно структурное подразделение;

– требование распространяется на одно должностное лицо.

4. Наличие частичного или полного выполнения требования организацией до постановки задачи по его выполнению в рамках формулировок требований стандартов систем менеджмента:

– требование не выполняется ни в каком виде до его внедрения согласно формулировкам стандартов систем менеджмента;

– требование частично выполняется, согласно формулировкам стандартов систем менеджмента, требуются доработки;

– требование полностью выполняется согласно формулировкам стандартов систем менеджмента.

5. Наличие необходимости привлечения сторонних организаций для выполнения требования:

– требование возможно выполнить только в рамках привлечения сторонней организации;

– требование возможно выполнить собственными силами организации.

6. Наличие необходимых ресурсов (персонал, оборудование, бюджет и пр.) на выполнение требования:

– ресурсы для выполнения требования отсутствуют, рекомендуется рассмотреть альтернативные варианты выполнения требования;

– ресурсы присутствуют не в полном объеме, необходимо привлечь дополнительно ресурсы для выполнения требования;

– ресурсы присутствуют в полном объеме и могут быть потрачены на выполнение требования.

Полученные оценки будут лежать в основе планирования и реализации спринтов, обеспечивающих четкий ритм построения отраслевой системы менеджмента качества.

Таким образом, применение подходов из области управление проектами может существенно повысить эффективность внедрения систем менеджмента на предприятиях.

Список литературы

1. СТО Газпром 9001-2018 Стандарт Публичного акционерного общества «Газпром». Системы менеджмента ПАО «Газпром». Системы менеджмента качества. Требования.

2. Все о SCRUM. Изучение, разработка, интеграция. Клод Обри. ООО «Издательство «Эксмо», 2021.

Ахрамович Алексей Александрович, аспирант, ahramovich-aleks@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт,

Борисова Екатерина Викторовна, канд. техн. наук, доцент, borisovaev@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт,

Архипов Павел Юрьевич, аспирант, 89686076088@mail.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Одиноков Сергей Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, odinokovsa@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт

APPLICATION OF THE PROJECT APPROACH FOR THE DEVELOPMENT OF MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON STO GAZPROM 9001-2018

A.A. Akhramovich, E.V. Borisova, P.Y. Arkhipov, S.A. Odinokov

The article discusses the issues of developing a quality management system at an enterprise through the introduction of industry standards. The analysis of the system features based on the STO Gazprom 9001-2018 standard is carried out. The possibilities of using the approaches adopted in project management in relation to the development of a quality management system are considered. The assessment of the complexity of the work for planning and implementing an industry system in the form of sprints was carried out.

Key words: quality management system, industry system, Gazprom service station, project management, sprints, labor intensity.

Akhramovich Aleksey Aleksandrovich, postgraduate, ahramovich-aleks@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute,

Borisova Ekaterina Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, borisovaev@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute,

Arkhipov Pavel Yurievich, postgraduate, 89686076088@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute,

Odinokov Sergey Anatolievich, doctor of technical sciences, professor, odinokovsa@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute

УДК 004.413
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-192-193

АЛГОРИТМ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ ВАРИАТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

И.А. Беляева, В.Н. Козловский, Д.И. Панюков, Е.В. Пантюхина

В работе разрабатывается алгоритм процесса рационализации вариативности при проектировании силовой установки электромобиля с точки зрения качества подбора электродвигателя.

Ключевые слова: автомобильная промышленность; качество; проектирование; электромобиль; электродвигатель.

Выбор тягового электродвигателя для конкретного электромобиля достаточно сложный процесс. Необходимо учесть многие параметры, которые прямо или косвенно влияют на характеристики транспортного средства. На этапе проектирования необходимо определиться с теми выходными данными тягового электродвигателя, которые будут удовлетворять условиям по производительности и соответствовать требуемым характеристикам электромобиля [1, 2].

Первое, на что нужно обратить внимание при выборе тягового электродвигателя – это непосредственно характеристики транспортного средства, которые в большей степени определяют влияние условий эксплуатации электромобиля [3, 4]. Примерами таких характеристик могут быть – максимальный пробег электромобиля без зарядки или циклы вождения (город или дальние расстояния), какой вариант или объем ячеек у батарей и т.д.

Следующее, на что нужно обратить внимание – это проектируемая максимальная скорость электромобиля, которую необходимо поддерживать на трассе. Например, в КНР имеется запрет на максимальную скорость, чего

нет в российских правилах. Отсюда необходимо понимать, ставить блокирующие сигналы или нет в соответствующую электронную систему обеспечения безопасности или запреты на какие-либо действия со стороны системы [5, 6].

Данный параметр, определяющий максимальную скорость движения, также следует учитывать при решении косвенных задач, связанных с оценкой скорости при движении автомобиля под уклон. Зная уклон и вес транспортного средства рассчитывается максимально возможный крутящий момент при максимальной и минимальной скорости транспортного средства [7, 8].

Далее, важным элементом при выборе тягового электродвигателя, является комплексный подход при анализе выходных характеристик тяговой батареи, с ограничением напряжения IGBT(insulated-gate bipolar transistor - биполярный силовой транзистор с изолированным затвором), используемых в контроллере электродвигателя. При неисправности IGBT-модуля в инверторе (MCU - Motor Controller Unit электронный модуль, который взаимодействует между батареями и двигателем для управления скоростью и ускорением электромобиля.) возникает ошибка, которая не допускает движение, но позволяет включать высоковольтное питание и нагрузку по стабилизации снижения запрашиваемого момента электродвигателя берет на себя главный электроблок – Vehicle Control Unit - Блок управления, который управляет функциями трансмиссии, а также общими функциями автомобиля **(**VCU), транспортное средство выходит из строя. Причиной поломки IGBT-модуля может быть резкий скачок тока, а это необходимо контролировать, т.к это напрямую влияет на качество готового изделия [9, 10].

Итак, электропривод состоит из приводного электродвигателя, контроллера приводного электродвигателя, редуктора и высоковольтных соединительных компонентов (рисунок 1), которые преобразуют электрическую энергию в механическую, создавая движущую силу. Движущая сила передается на колеса через приводной вал и ведущую ось для реализации движения вперед и назад. Данная конструкция подходит для удовлетворения потребностей различных рабочих действий, таких как запуск, ускорение, подъем и прочие эксплуатационные действия автомобиля. При условиях нормального движения силовой агрегат обеспечивает движущую силу для всего автомобиля [11, 12]. При торможении или спуске электродвигатель может преобразовывать часть кинетической энергии в электрическую и накапливать ее в аккумуляторе [13].

В процессе проектирования новой конструкции электромобиля, решается задача по первичному выбору нескольких вариантов тяговых электродвигателей, каждый из которых имеет свои технические характеристики, далее проводятся комплексные исследования, позволяющие получить наилучший вариант исполнения с выбором конкретного тягового электродвигателя в составе электромобиля [14, 15].

Ниже, представлены требования, которые необходимо выполнить для проведения расчетов тяговых характеристик и динамики

электромобиля, компьютерного моделирования теоретически возможного максимального пробега в различных испытательных циклах, а также для подбора оптимального набора ячеек тяговых аккумуляторных батарей:

Электродвигатель:

1. ВСХ (внешние скоростные характеристики - Torque Curves) для напряжений 200В, 225В, 273В, 300В, 315В, 330В, 350В, 380В, 400В, 450В, 470В. Обязательно на характеристиках указать значения крутящего момента при скорости вращения выходного вала электродвигателя 0 мин$^{-1}$. Характеристики предоставить как для номинального режима (долговременный (не менее 30 мин) режим мощности, согласно правилам ЕЕК ООН №85), так и для режима кратковременной максимальной мощности (peak power).

2. Карты КПД (efficiency maps). Необходимо определить характеристики как для тягового режима работы электродвигателя, так и для работы электродвигателя в режиме рекуперации при торможении.

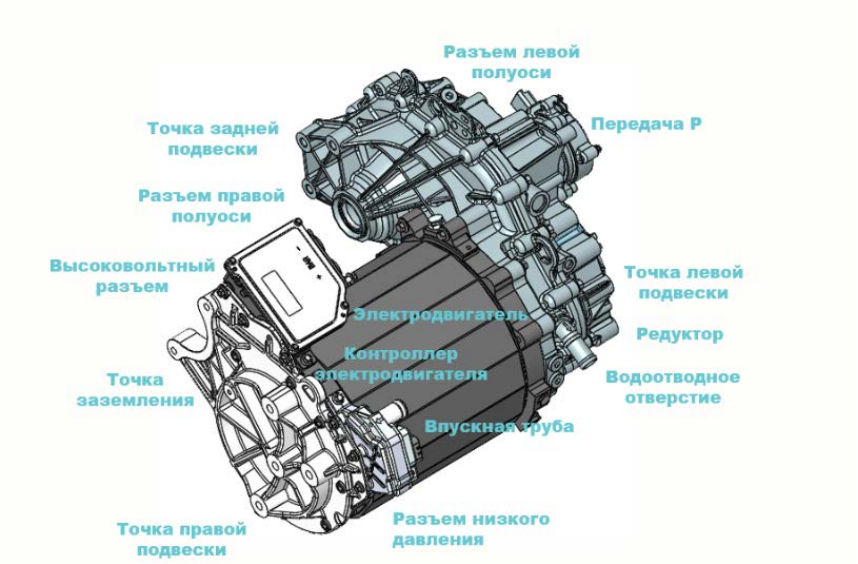


Рис. 1. Тяговый электродвигатель электромобиля

Редуктор+дифференциал:

1. Общий КПД редуктора и передаточное число.

2. Конструкция, тип передач и кинематическая схема с указанием количества зубьев каждой шестерни. По данному пункту информация нужна в виде достаточном для понимания принципа работы и самостоятельной проверки заданного КПД редуктора и дифференциала.

Система управления:

1. Список функций, описание и их возможная реализация;

2. Описание используемых протоколов, матрица сообщений;

Прочее:

1. Габаритные чертежи с указанными присоединительными размерами;

2. Требования по установке силового агрегата;

3. Требования по максимально допустимым крутильным колебаниям и предельным углам установки;

4. Требования по системе охлаждения;

5. Перечень необходимых испытаний в составе ТС – транспортного средства (на прототипе);

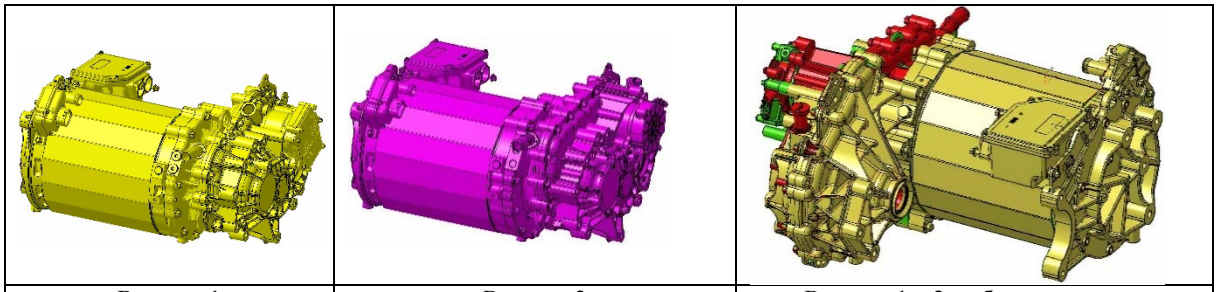
6. Требования по подключению электроустановки;

7. Требования на компоненты, взаимодействующие с СА – силовым агрегатом (например, переключатель режимов движения и т.д.)

8. Описание системы смазки двигателя и требования к маслу;

9. Общие технические требования на силовой агрегат.

Чтобы адекватно оценить модель, каждый спроектированный вариант двигателя проверяли на компоновочную стыковку в подкапотном пространстве (рисунок 2).



Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1 и 2 – общая геометрия

Рис. 2. Геометрическое и техническое сравнение вариантов двигателя

В процессе проектирования электродвигателя и поиске оптимального его расположения в подкапотном пространстве затрагивают несколько систем [16, 17]. Например, штуцер силовой конструкции электродвигателя расположился напротив штуцера подогревателя. На рисунке 2 видно, что есть большой риск касания между патрубками системы терморегулирования при небольшом перемещении СА.

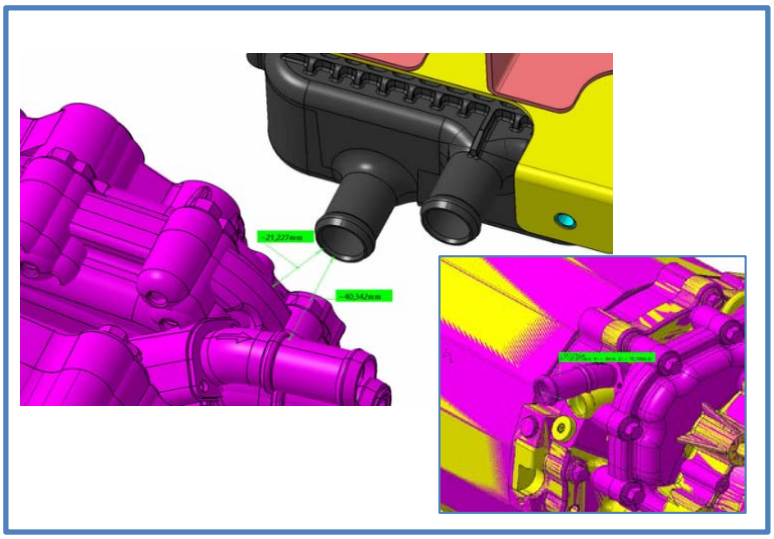


Рис. 3. Вариативность геометрии штуцера подключения терморегулирования

Для рационализации расположения электродвигателя, всегда имеется необходимость небольшого вращения или перемещение на некоторое расстояние [18, 19]. К примеру, при трассировке жгутов и электрических разъемов, необходимо учитывать угол поворота низко- и высоковольтных жгутов и место подключение к СА прорисовывается детально (рисунок 4)

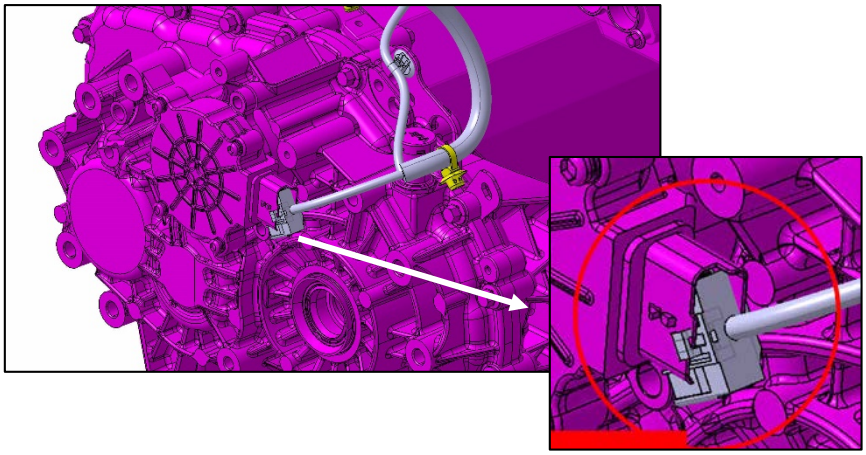


Рис. 4. Место геометрического конфликта между силовым агрегатом и электрическим разъемом

По рисунку 4 видно, что требуется корректировка подключения жгута проводов, имеется конфликт с заправочной горловиной (предположительно), что влечет за собой изменение трассы жгутов [20].

Значимым при компоновочных работах является разница расположения центра дифференциала с силовым агрегатом. Максимально возможный поворот в пространстве – 5 градусов. На рисунке 5 показано наложение двух вариантов двигателя.

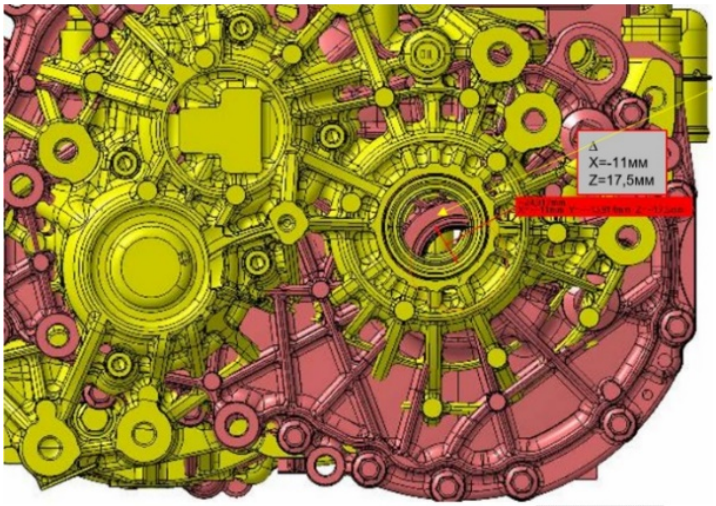


Рис. 5. Расположение центра дифференциала

При физической проверке, было выявлено, что образец варианта 2 более подходит по геометрическим параметрам к проектируемому электромобилю (рисунок 6).

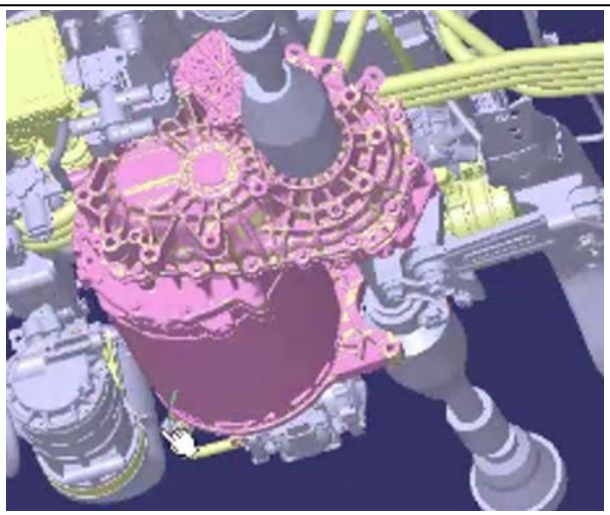


Рис. 6. Электродвигатель в составе электромобиля

Выбор типа электродвигателя имеет решающее значение для обеспечения требуемой производительности электромобиля и удовлетворительного вождения при разных условиях. Каждый тип электродвигателя имеет определенные выходные характеристики и ограничения, которые необходимо тщательно оценить и учесть при выборе разрабатываемого электромобиля. Экспериментальные различные расчеты, математическое моделирование поведения конструкции под нагрузкой, проектирование подкапотного пространства и т.д – обязательны к серьезной проработке, т.к. эти шаги прямо влияют на качество готового продукта – электромобиля. Например, коммерческий электромобиль, используемый для городских доставок, будет иметь иные характеристики, в сравнении с характеристиками электромобилей некоммерческого исполнения. Понимание этих различий помогает сделать осознанный выбор компонента, сравнить и рассчитать потребные характеристики как электродвигателя, так и самого транспортного средства.

Список литературы

1. Козловский В.Н. Моделирование электронной системы vvt управления двигателем легкового автомобиля / В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 4. С. 5-12

2. Панюков, Д.И. Формирование эффективной FMEA-команды / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, С.А. Шанин // Стандарты и качество. 2017. № 7. С. 68-72.

3. Дебелов, В.В. Электронная система управления автомобиля "start-stop" / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 2. С. 6-9.

4. Kozlovskiy, V. System of customer satisfaction monitoring by new cars in view of perceived quality / V. Kozlovskiy, D. Aydarov // Quality - Access to Success. 2017. Т. 18. № 161. С. 54-58.

5. 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.

6. Николаев П.А. Многофакторная оценка влияния дорожной обстановки на помехоустойчивость бортового электротехнического комплекса автомобилей / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорний, А.С. Саксонов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 1. С. 36-41.

7. 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.

8. 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.

9. Николаев, П.А. Оценка соответствия автомобилей требованиям помехоустойчивости к внешним электромагнитным воздействиям / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорний // Грузовик. 2017. № 10. С. 44-48.

10. Козловский, В.Н. Математическая имитационная модель оценки зарядного баланса автомобиля / В.Н. Козловский, У.В. Брачунова, А.В. Крицкий, А.С. Саксонов // Грузовик. 2021. № 7. С. 17-26.

12. Панюков, Д.И. Моделирование процедуры FMEA: анализ рисков / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 9. С. 34-43.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

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,

Панюков Дмитрий Иванови, д-р техн. наук, профессор, panyukov.di@samgtu.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

ALGORITHM FOR RATIONALIZING VARIABILITY IN DESIGNING A POWER PLANT FROM THE POINT OF VIEW OF ENSURING THE QUALITY OF ELECTRIC MOTOR SELECTION

I.A. Belyaeva, V.N. Kozlovsky, D.I. Panyukov, E.V. Pantyukhina

The paper develops an algorithm for the process of rationalizing variability in designing an electric vehicle power plant from the point of view of the quality of electric motor selection.

Key words: automotive industry; quality; design; electric vehicle; electric motor.

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,

Panyukov Dmitry Ivanovi, doctor of technical sciences, professor, panyukov.di@samgtu.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 621.642
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-200-201

МЕТОД ДИАКОПТИКИ И МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ИНСПЕКТИРОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ФАКТОРОВ РИСКА ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ПОДХОДОВ

И.Н. Пузовик, О.Г. Гусева, П.А. Лонцих,
О.М. Сафонова, Н.П. Лонцих, А.Е. Пашков

Рассмотрена возможность применения методов диакоптики и механизмов деградации для эффективного управления технологическими рисками, включая своевременное реагирование на изменения факторов, приводящих к реализации рисков, связанных с разрушением, авариям, разгерметизацией трубопроводного оборудования

Ключевые слова: диакоптика, механизм деградации, метод расчленения, эффективность, качество продукции, моделирование рисков.

В системном менеджменте очевидна необходимость применения инструментария риск-менеджмента для достижения целей предприятия. Как правило все ожидаемые собственниками бизнеса показатели финансовой стабильности и стратегической успешности связаны с ключевыми ресурсами предприятия, обеспечивающими основные производственные процессы. И в этой концепции архиважным становится качество применяемых методов прогнозирования или работа с рисками.

Управление рисками на высокотехнологичных предприятиях, как правило, характеризуется сложной иерархической и видовой структурой, отражающей сложность процессов и взаимодействий на предприятии, а также многообразием подходов и методов.

Анализ риска проводится с различной степенью детализации и сложности, в зависимости от цели анализа, доступности и достоверности информации и доступных ресурсов. Методы анализа выбираются как качественными, так и количественными или их комбинациями в зависимости от обстоятельств и предполагаемого использования. Стандарт ИСО 31000-2019 гласит, что крайне неопределенные события могут плохо поддаваться количественной оценке, что может являться проблемой при анализе событий с существенными последствиями. В таких случаях использование комбинации методов предпочтительней.

Идея метода расчленения или диакоптического подхода может быть использована для решения практически любых задач с большим числом переменных. Диакоптика применяется для перехода от сложной системы к более простой через разделение общего на изолированные части. Сложная система по определенным правилам раскладывается на N число малых подсистем, и для каждой из них в отдельности далее проводится требуемый анализ. Полученные результаты всех исходных подсистем объединяются в одно аналитическое выражение, в целую исходную систему.

Сначала рассчитывается система, которая не представляет трудности, группа несвязанных подсистем, а затем все полученные системы складываются в решение исходной системы уравнений.

Эффективность метода диакоптики проявляется наиболее полно при анализе сложных систем и сводится к сокращению затрат машинного времени. Положительным моментом также является то, что метод расчленений дает тот же самый результат, что и расчет всей системы целиком, но получить этот результат можно намного быстрее и проще. При этом если метод анализа отдельных подсистем будет достаточно точным, то и конечный результат будет таким же; если же методы будут приближенными, то и результат будет приближенным.

Метод диакоптики в управлении рисками предлагается применять при декомпозиции риска, как сложной системы, на причины и подпричины, как подсистемы сложной системы. Зная частоту вероятности возникновения данных причин и подпричин, можем вычислить уровень вероятности самого риска. Данный подход поможет нам провести анализ технологических рисков, встречающихся на любом высокотехнологичном предприятии, с более точной оценкой и ранжированием данных рисков по важности для концентрирования внимания на них и степени тяжести последствий от угроз, которые приведут к масштабным негативным событиям для предприятия [2-4].

Стандарт ИСО 9001:2015 требует развивать у персонала риск-ориентированное мышление, что, в свою очередь, определяет риск-ориентированный подход в процессе анализа работы технологического оборудования на высокотехнологичных предприятиях, а именно его технического освидетельствования и диагностирования, что приводит к выводам о несовершенстве и недостаточности применения методов экспертной оценки, проводимых плановых инспекций, а также о необходимости идентификации зон, требующих концентрации усилий и контроля. Все это привело к разработке и применению метода проведения инспекций оборудования с учетом факторов риска.

Данный метод позволил нам провести анализ по стандартам серии API, разработанным американским институтом нефти (API), помогающим скоординировать деятельность по руководству и управлению предприятием с учетом факторов риска, и представляет собой процесс оценивания и управления рисками, который направлен на предотвращение разрушений оборудования, работающего под давлением, входящего в комплекс технологического оборудования, из-за различных несоответствий. Управление данными рисками реализовано нами путем проведения инспекции оборудования с учетом факторов риска, целью которой является получение информации об изменении технического состояния и уровня риска безопасной эксплуатации оборудования, ее анализа для принятия управленческих решений и повышения эффективности стратегии технического освидетельствования и диагностирования, технических осмотров и ремонтов.

Данный процесс влияет на качество и сроки выпускаемой продукции в связи с износом или поломкой ключевого технологического

оборудования. Учитываемые факторы риска при проведения подобных инспекций в данной методике называются механизмами деградации (МД). К МД относятся все виды воздействия на сплав оборудования, возникающие при определенных условиях его эксплуатации, приводящие к потере несущих свойств металла и нарушению механической целостности (коррозия, эрозия, растрескивание, прочие механические и металлургические разрушения). Механизмы деградации материалов возникают по таким факторам, как прямое механическое воздействие, воздействие тепла или излучения, воздействие химических реагентов и когда две или более из категорий 1, 2, 3 объединяются синергически [5].

При проведении инспекций оборудования на высокотехнологичном предприятии, учитывая вышеперечисленные МД, проводится анализ вероятности отказа (в соответствии с стандартом API 581), что помогает:

1. Составить прогноз и предостеречь от потенциальных отказов (что способствует уменьшению вероятности отказа, тем самым уменьшая риски).

2. Определить соответствующие интервалы/сроки проведения технического освидетельствования (осмотра), точек контроля и используемых методов.

3. Обосновать принятие решений, которые исключают или снижают вероятность возникновения конкретного механизма деградации.

4. Выполнять немедленный останов оборудования при обнаружении критичных дефектов или достижении отбраковочной толщины для исключения отказа, аварии.

Изучив данный метод на практике на объектах высокотехнологичного предприятия, приходим к выводу о преимуществах управления рисками на основе постоянных динамических инспекций для мониторинга параметров механизмов деградации:

Прозрачный процесс системы управления коррозией;

Отслеживание технических параметров, влияющих на коррозионную активность;

Своевременные решения для снижения скорости коррозии и удержания риска разгерметизации на приемлемом уровне;

Более обоснованный подход к планированию капитальных ремонтов;

Развитие инспекционных циклов;

Уменьшение затрат на инспекции, требующих остановки производства и потери продукции. Получение экономического эффекта.

Таким образом, примененная на предприятии модель позволила нам ранжировать оборудование по критичности, оценить риски на текущий момент, выполнить прогнозирование технического состояния оборудования и рисков на заданный интервал времени в будущем. Использование модели дало возможность оценить эффективность планов технического обслуживания. В дальнейшем при автоматизации процедуры ожидается увеличение положительных эффектов за счет расширения вариативности выбора

оптимальных вариантов мероприятий и планов на основе многовариантного сравнения; осуществления технико-экономического обоснования продолжительности межремонтных пробегов.

В ходе проведенных исследований выявлены недостатки применяемой системы, такие как:

Передача данных из 1С ТОиР 3.0 осуществляется не в полном объеме;

Не в полной мере отработаны механизмы оперативного сбора экспертных групп в случае выхода параметров за допустимые границы;

Не в полной мере задокументированы возможные коррекции и корректирующие действия;

Не оформлен допуск к данным всем заинтересованным лицам;

Ограниченное распространение применения системы: не все объекты охвачены, что не позволило сделать общие выводы по аналогичным участкам, механизмам коррозии и пр.;

Ограничение диапазона охвата всех видов коррозии и механизмов повреждения совокупной компетентностью экспертной группы;

Обособленность системы от интегрированной системы менеджмента;

Не отлажена цикличность процесса (повторный анализ и оценка после проведенных мероприятий, в том числе, оперативные);

Не по всем контурам коррозии выгружаются данные с 1С ТОиР 3.0 на производственный портал компании, где полученные данные с датчиков формируются в виде графиков по распределению критичности.

По всем указанным направлениям намечены мероприятия по совершенствованию подходов. Часть недостатков решит автоматизация за счет ИС, объектом которой станут: всесторонний анализ на предмет коррозии и рисков отказов статического оборудования, повышение эффективности осуществления контроля за соблюдением требований, мониторинг коррозии, прогнозирование на основе полученных данных, автоматизация оповещения при выходе за диапазон значений операционных окон целостности, при увеличении скорости коррозии и величины риска свыше пороговых значений, при снижении толщины стенок меньше допустимых значений.

Еще одним аргументом в пользу автоматизации системы инспекций с учетом факторов риска (ИУФР) по итогам проведения инспекции, стала очевидная необходимость сбора и постоянной обработки многочисленных данных, а также необходимость оперативного отслеживания исходя из выведенных нами требований к частотности наблюдений. На ООО «ИЗП» было определено, что для получения более точных и своевременных данных по определению механизмов деградации, влияющих на разрушение высокотехнологичного оборудования, необходимо установить систему круглосуточного мониторинга коррозии, которая включает в себя «виртуальные» датчики коррозии, работающие по математическим моделям, производящим расчёт математической скорости коррозии. Данные «виртуальные» датчики помогут отслеживать все изменения круглосуточно с выводом на

мониторы дежурных операторов/диспетчеров. Таким образом мы получим динамическую виртуальную инспекцию с учетом факторов рисков, способствующую мгновенному предупреждающему реагированию на видимые изменения нарушения целостности оборудования. На схеме ниже смоделирован принцип работы данной системы в виде глобальной информационной системы (динамическая ИУФР) (рис.1).

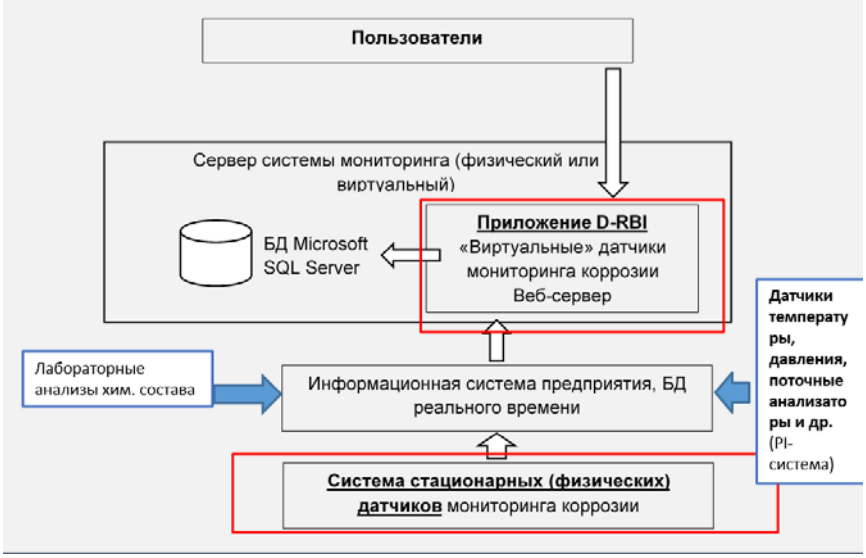


Рис. 1. Схема моделирования инспекций с учетом факторов риска (ИУФР)

Принцип работы «виртуальных датчиков» основывается на том, что происходит деление на интервалы времени, когда действовали одинаковые условия коррозии, расчёт скорости коррозии для каждого интервала по моделям и определение, таким образом, потери толщины, что позволяет сформировать прогноз остаточного ресурса по механизмам потери толщины (рис.2).

Соответствующее программное обеспечение должно также иметь функции сигнализации и отправки сообщений в случае выхода из окна операционной целостности. Сообщение об отклонении автоматически будет отправляться ответственному лицу.

Новизна данного подхода заключается в том, что, используя диакоптику и метод механизмов деградации (ИУФР) совместно, управление технологическими рисками осуществляется комплексно с учетом применения как традиционных качественных оценок, так и мало применяемых на рассматриваемых предприятиях количественных оценок рисковых событий, что делает картину по рискам более прозрачной, и охватывает диапазон вероятности наступления негативных событий шире, благодаря тому, что вероятность наступления рискового события диверсифицируется до минимальных пределов, ее мониторинг и контроль происходит на ежесуточной основе [6]. В связи с этим, управление рисками становится эффективным инструментом системы менеджмента, помогающим своевременно избежать разрушения высокотехнологичного оборудования, а значит защитить предприятие

от непредусмотренных потерь, как с экономической точки зрения (поломка оборудования, простой, упущенная маржинальная выгода, производство некачественного продукта, например, минимизация посторонних включений), так и с репутационной (экологическая катастрофа, причинение вреда здоровью людей, потеря потенциальных клиентов).

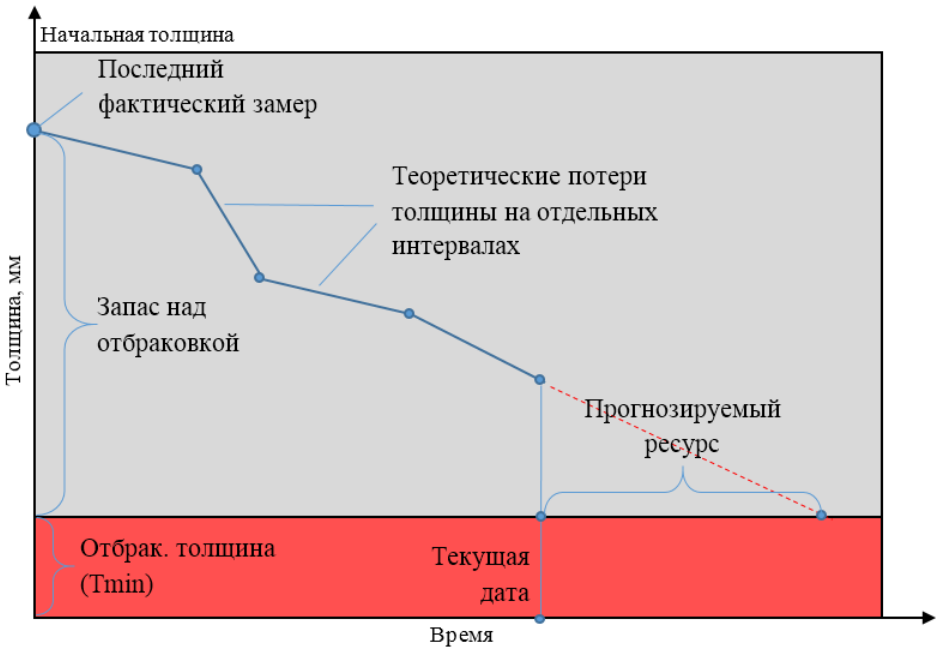


Рис. 2. Прогноз остаточного ресурса по механизмам потери толщины

В свою очередь, переход от динамического ИУФР к динамической модели управления рисками, применение предупредительных подходов управления механизмами деградации и диакоптики видится нам наиболее оптимальным и эффективным путем совершенствования имеющихся методов экспертной оценки для управления рисками, связанными с процессами управления оборудованием на высокотехнологичных предприятиях.

Список литературы

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям. Диакоптика. М.: Наука, 1972. 114-115 с.

2. Вейц В.Л., Кочура А. Е., Лонцих П.А. Структурированные модели и методы расчета сложных управляемых систем в технике и экономике. Ростов-на-Дону, 2002. 200 с.

3. Лонцих П.А. Обеспечение качества и управление динамическими процессами технологических систем. Ростов-на-Дон: Изд-во Рост. унив-та, 2003. С. 236-237.

4. Михайловский И.А. Учет технологических рисков при анализе качества продукции путем иерархической декомпозиции качества / И.А. Михайловский, Е.И. Гун // Качество в обработке материалов. 2014. № 2 (2). С. 33 - 38.

5. Робастный подход к логистическому инжинирингу на этапах концептуального проектирования / Н.З. Базылева, Р.А. Панов, А.Ф. Можчиль,

М.С. Володькин, И.А. Богачев, Н.Д. Шурупов // Нефтяное хозяйство. 2019. № 1. С. 104-108.

6. Pawel A. Lontsikh; Elena Y. Golovina; Malika V. Evloeva; Ilya I. Livshitz; Andrey V. Koksharov Implementation of ESG sustainable development concept criteria using the robust design methods 2022 International Conference on Quality Management, (IT&QM&IS), Year: 2022 | Conference Paper | Publisher: IEEE.

Пузовик Ирина Николаевна, главный специалист по интегрированной системе менеджмента группы разработки ИСМ отдела развития систем менеджмента (ОРСУ), Puzovik_IN@irkutskoil.ru, Россия, Иркутск, ООО «Иркутский завод полимеров»,

Гусева Ольга Геннадьевна, координатор по рискам группы управления рисками отдела развития систем менеджмента службы повышения эффективности производства, Puzovik_IN@irkutskoil.ru, Россия, Иркутск, ООО «Иркутский завод полимеров»,

Лонцих Павел Абрамович, д-р техн. наук, профессор, palon@list.ru, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Сафонова Ольга Михайловна, аспирант, olyastefanovskaya@mail.ru, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Лонцих Наталья Павловна, канд. пед. наук, доцент, natalysib@list.ru, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Пашков Андрей Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, директор Института авиамашиностроения и транспорта, pashkov@istu.edu, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет

DIACOPTICS METHOD AND EQUIPMENT INSPECTION MANAGEMENT MODEL BASED ON RISK FACTORS FOR IMPROVING EXPERT APPROACHES

I.N. Puzovik, O.G. Guseva, P.A. Longsikh, O.M. Safonova, N.P. Longsikh, A.E. Pashkovo

The article shows that the possibility of using the diakoptics method and the degradation mechanisms method in a comprehensive manner for effective management of technological risks for timely response to threats that lead to equipment destruction at high-tech enterprises, which in turn will affect the quality of products/goods, which will lead to the loss of the enterprise's reputation, lost marginal profit and, possibly, subsequent bankruptcy and termination of business activities. Both methods are relevant today, but are of little use as independent tools in the risk management system.

Key words: diakoptics, degradation of mechanisms, dissection methods, product quality, risk modeling.

Puzovik Irina Nikolaevna, chief specialist for the integrated management system of the ISM development group of the management systems development department (ORSU), Puzovik_IN@irkutskoil.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk Polymer Plant LLC,

Guseva Olga Gennadievna, risk coordinator of the risk management group of the management systems development department of the production efficiency improvement service, Puzovik_IN@irkutskoil.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk Polymer Plant LLC,

Longtsikh Pavel Abramovich, doctor of technical sciences, professor, palon@list.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University,

Safonova Olga Mikhailovna, postgraduate, olyastefanovnaya@mail.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University,

Lontsikh Natalia Pavlovna, candidate of pedagogical sciences, docent, natalysib@list.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University,

Pashkov Andrey Evgenievich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, director of the institute of aircraft engineering and transport, pashkov@istu.edu, Russia, Irkutsk, Irkutsk Polymer Plant LLC

УДК 658.562
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-207-208

ЦИФРОВОЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Е.К. Савич, И.П. Васильева, Е.А. Тарасова

В статье представлен цифровой инструментарий управления персоналом, позволяющий повысить осведомленность и компетентность сотрудников производственных предприятий в области управления качеством, отличающийся тем, что включает расчёт KPI процессов оценки результативности и эффективности работы персонала. Применение данного цифрового инструментария позволит сократить сроки подготовки управленческих решений, исключить дублирующие функции бизнес-процессов, усилить нацеленность на результат персонала предприятия, задействованного в реализации ключевых операций, а также оптимизировать потери на всех этапах производственных процессов.

Ключевые слова: Цифровизация, цифровой инструментарий, система менеджмента качества, бизнес-процесс организации, управление качеством, управление персоналом, KPI, компетентность, обучение, результативность.

Для конкурентоспособности любого предприятия необходим высококвалифицированный персонал. При обеспечении стабильного и высокого качества производимой продукции необходимо постоянно повышать уровень знаний работников предприятий в области управления качеством. Процесс управления персоналом определяет правила и процедуры определения потребности в персонале, требования к компетентности персонала, оценку и повышение компетентности персонала.

Для эффективной работы сотрудников необходимо обучение требуемым компетенциям. Обучение персонала должно быть комплексным, с учётом специфики производства и соблюдением нормативного законодательства. На этапе цифровизации машиностроительного производства вопрос применения цифровых компетенций персонала становится

актуальным. Цифровизация процессов на этапе производства поможет снизить риск участия человеческого фактора в протекающих бизнес-процессах. Автоматизированные системы и роботизированное оборудование помогает выполнять необходимый процесс более точно и эффективно, снижая вероятность возникновения брака, возникающего из-за различных человеческих факторов (недостаточной внимательности из-за низкой квалификации рабочего, рассеянности из-за плохого самочувствия сотрудника, усталости от перегруженности и т.д.).

Одно из сильных сдерживающих факторов внедрения процесса цифровизации на предприятии – это противодействие персонала возможным изменениям и инновациям. Любые глобальные изменения вызывают процесс сопротивления у сотрудников. Многие из них просто не готовы к изменениям, не имеют необходимых знаний и навыков. Для этого необходимо приложить максимум усилий к обучению, передаче опыта в части использования цифровых технологий. Для повышения вовлечённости персонала в цифровизацию процессов необходимо обеспечить цифровизацию различных аспектов работы, с которыми работники взаимодействуют каждый день, например, автоматизировать систему обучения.

Одним из плюсов предлагаемой концепции цифровизации процесса управления персоналом станет повышение квалификации и реальная оценка навыков и потенциала сотрудников, так как программный продукт учитывает работу с актуализированными матрицами компетенций, различными оценочными формами и внутренними адаптационными учебными курсами.

Главными процессами цифрового инструментария управления персоналом являются: адаптация персонала и оценка его компетентности, оценка осведомленности и мотивации персонала, оценка удовлетворенности персонала, внутреннее и внешнее обучение (рисунок 1).

Для разработки цифрового инструментария «Управление персоналом», как обеспечивающего прочеса системы менеджмента качества, выявлены основные подпроцессы, для каждого из которых определены входные и выходные данные, на основании которых установлены процедуры, подлежащие автоматизации с целью последующей оцифровки данного бизнес-процесса.

Предлагаемый цифровой инструментарий реализован в виде программного обеспечения «Управление персоналом» и включает в себя несколько модулей:

-модуль разработки матриц компетентности персонала;

-модуль планирования обучения;

-модуль осведомленности персонала;

-модуль обучения на рабочем месте;

-модуль оценки компетентности персонала.

Модуль разработки матриц компетентности персонала. Ключевой задачей управления персоналом является создание образовательного пространства для организации процесса формирования и развития профессиональных компетенций сотрудников предприятия. Предлагаемый

программный модуль для проведения обучения сотрудников, осуществляет обучение на основе принципа непрерывности повышения квалификации каждого сотрудника в течение всей его производственной деятельности. Система непрерывного профессионального образования подразумевает работу платформы с актуализированными базами данных матриц компетенций.

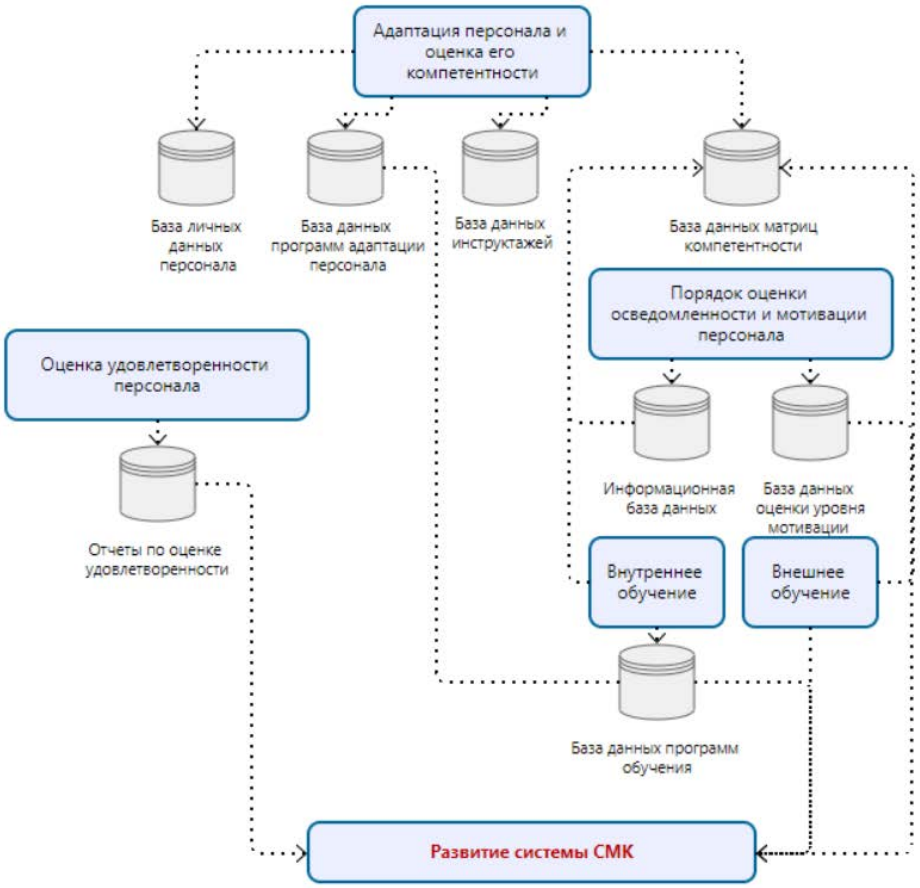


Рис. 1. Связь между базами данных и процессами

Модуль планирования обучения. В рамках данного модуля предлагается единая база знаний для цифровых компетенций, учитывающих специфику знаний инструментов и методик управления качеством продукции, которая позволит быстро и в соответствии со стандартами повышать квалификацию действующих сотрудников и начинающих специалистов. Причем обучающий процесс необходимо формировать с учётом специфики должностей сотрудников предприятия. Предлагаемый модуль позволяет добавлять к базовым знаниям дополнительные модули обучения и тем самым проводить повышение квалификации сотрудников более персонально.

Программный модуль содержит следующие разделы:

личный кабинет сотрудника, с возможностью прохождения курсов и просмотра своего прогресса;

личный кабинет администратора (разработчика) с возможностью рассылки обновлений, регистрации новых кабинетов, заведения администраторов (организаций), сбора данных, добавления материалов курсов;

личный кабинет организации, с возможностью размещения и редактирования материалов курса, возможностью выбора приоритетных направлений обучения для конкретных сотрудников, возможностью просмотра личных данных сотрудников и их прогресса, возможностью добавления сотрудников, возможностью создания собственной траектории обучения;

личный кабинет преподавателя, с возможностью проверки практических занятий, ответа на вопросы по образовательным программам сотрудников;

платформа для обучения, с возможностью размещения коротких курсов по выбранной тематике, которые содержат: видеоролики, методические указания, практические занятия, итоговое тестирование;

данные курсов, сформированные по разделам;

базы данных.

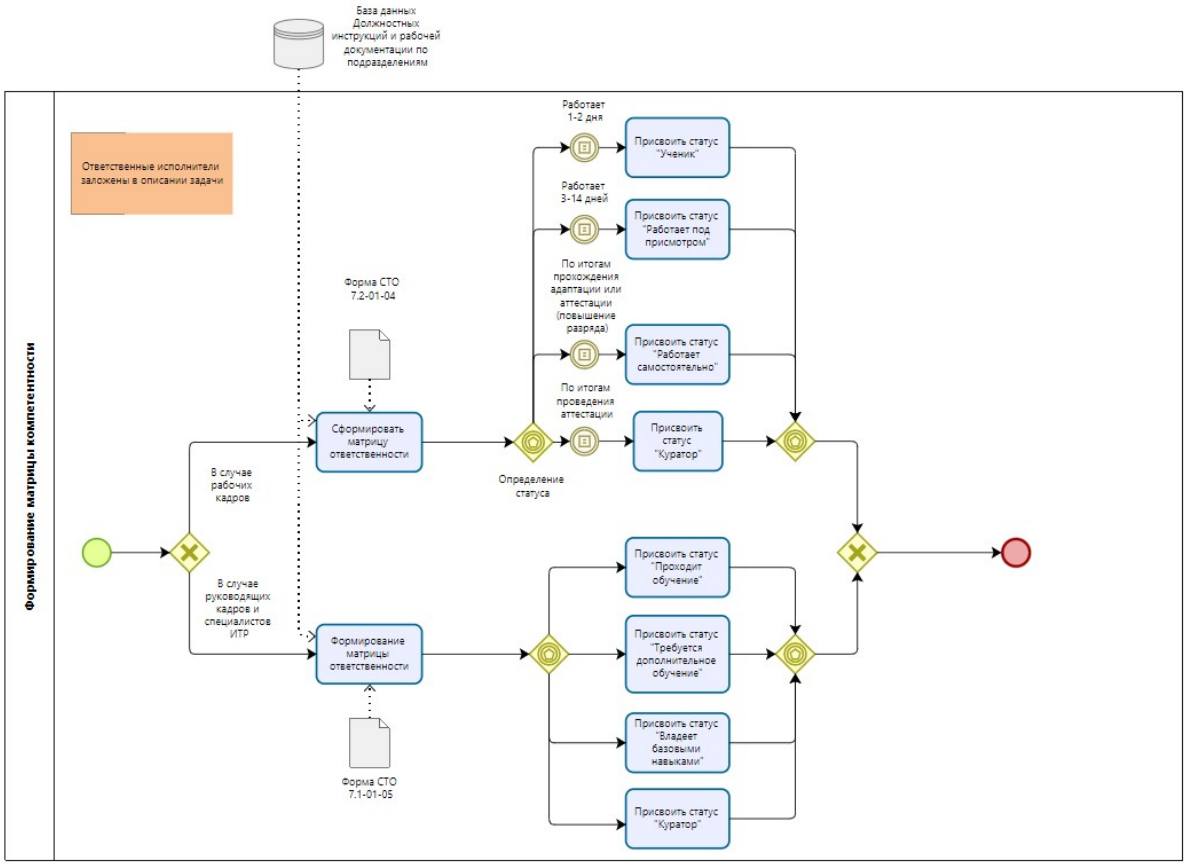


Рис. 2. Нотация BPMN модели бизнес-процесса формирования матрицы компетентности персонала

Структурно-функциональная схема работы с личными кабинетами представлена на рисунке 3.

Модуль осведомленности персонала. Использование цифровой базы знаний в модуле осведомленности персонала решает ряд проблем, связанных с документированием и управлением записями, процессным контролем и анализом данных, что на выходе позволяет связать подпроцессы управления персоналом внутри всей организации.

Модуль обучения на рабочем месте. Управление обучением и развитием персонала в предложенной модели представлено в виде виртуального методического центра компетенций в области системы менеджмента качества – онлайн-среда, которая объединяет знания, опыт и ресурсы для обеспечения эффективного функционирования системы менеджмента качества на предприятии.

Модуль позволит разработать корпоративную траекторию обучения, ориентированную на практическую ситуацию для сотрудников от «лучших и действующих практиков» с применением активных и актуальных форм обучения.

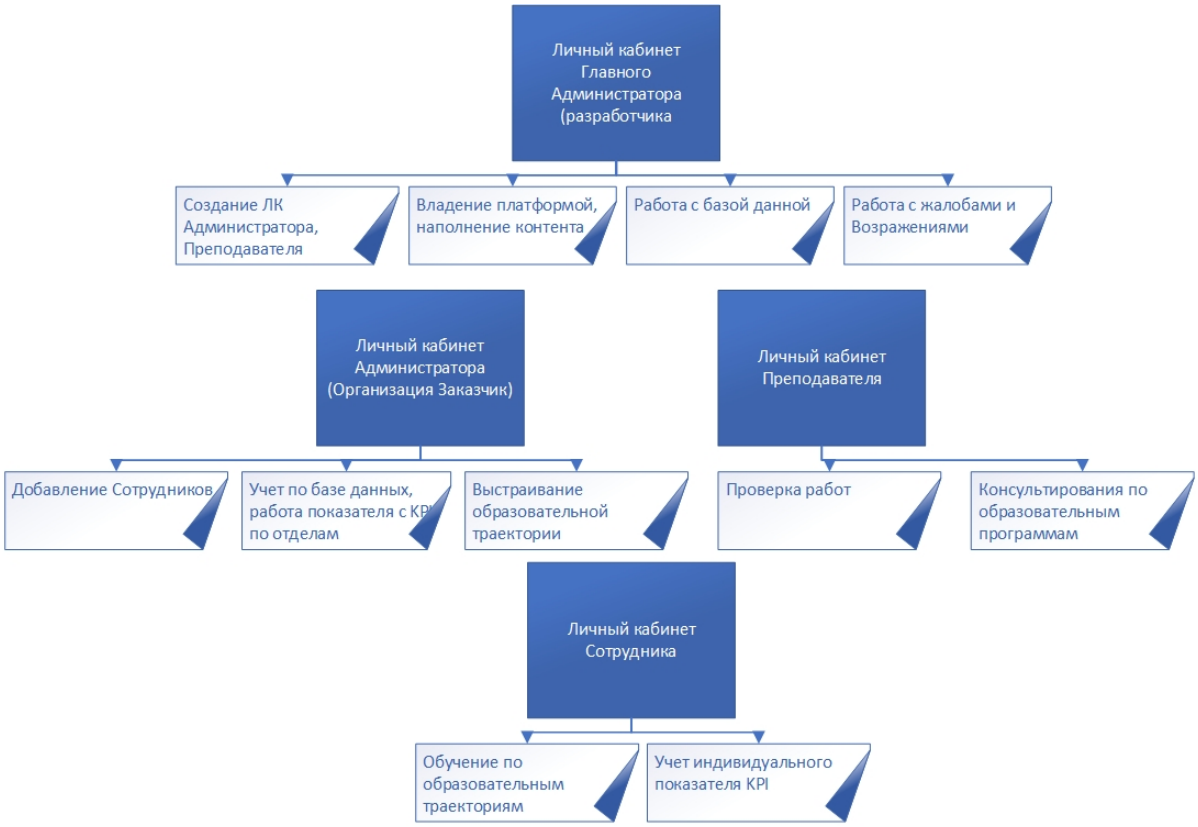


Рис. 3. Структурная схема работы с личными кабинетами пользователей

Бизнес-процесс проведения внутреннего обучения персонала представлен на рисунке 4.

Модуль оценки компетентности персонала

При расчете KPI проекта учитывается производительность, как отношение результата к затраченному времени.

$$KPI = \frac{\text{Ключевые характеристиики (сумма индивидуальных)}}{\text{плановое значение (для определенного курса)}} \times 100\% \qquad (1)$$

Плановое значение для курса будет состоять из суммы показателей, которые присвоены к определённым категориям и назначены экспертом.

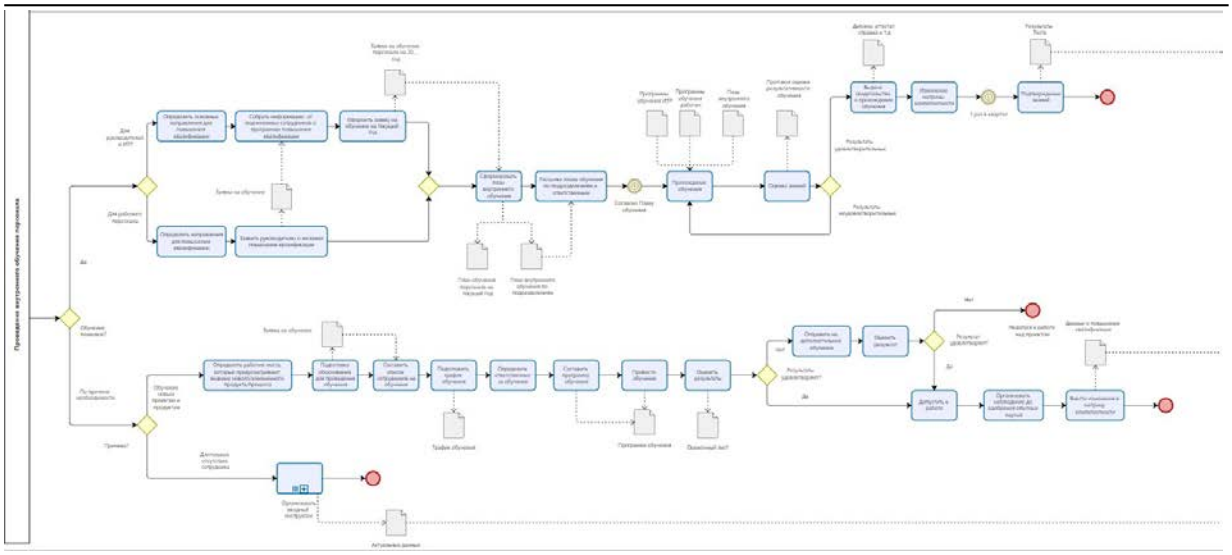


Рис. 4. Нотация BPMN модели бизнес-процесса проведения внутреннего обучения персонала



Рис. 5. Демонстрация расчёта KPI сотрудника предприятия

Итоговая суммарная оценка идёт в плановый показатель. Индивидуальное значение будет учитываться исходя из того, как продвигается обучение сотрудника по данной траектории обучения (то есть по факту пройденного материала).

Далее данную оценку можно учитывать для премиального вознаграждения сотрудников.

Оценка компетентности персонала в данной системе является неотъемлемой частью процесса анализа результативности применения цифрового инструментария по управлению персоналом.

В данной статье предложен цифровой инструментарий управления персоналом в системе менеджмента качества, позволяющий повысить осведомленность и компетентность сотрудников производственных предприятий в области управления качеством, отличающийся тем, что включает расчёт KPI процессов оценки результативности и эффективности работы персонала.

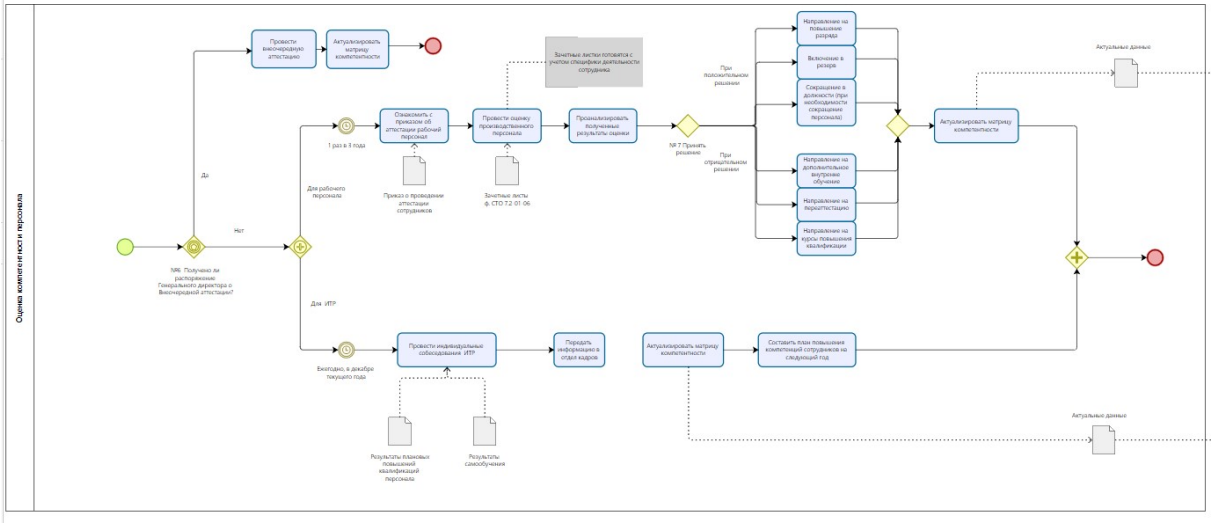


Рис. 6. Нотация BPMN модели бизнес-процесса оценки компетентности персонала

Эффектом применения предлагаемого цифрового инструментария управления персоналом являются развитие потенциала работников предприятия, привлечение талантливых человеческих ресурсов, развитие HR бренда, развитие цифрового лидерства, снижение затрат при подборе персонала, повышение социальной ответственности бизнеса.

Список литературы

1. Долженко Р.А. Проблемы на пути цифровой трансформации на российских промышленных предприятиях / Р.А. Долженко, Д.С. Малышев // Вестник НГУЭУ. Новосибирск, 2022. С. 31-51.

2 Антипова О.И. Подходы к цифровизации систем менеджмента качества / Антипова О.И., Горохова Д.А. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула, 2023. С. 106-110.

3 Тарасова Е.А. Цифровизация центра компетенций в вопросах управления качеством / Е.А. Тарасова, Е.К. Савич // Научно-технический прогресс: Информация, Технологии, Механизм. Стерлитамак: Изд-во: Аэстерна, 2024. С. 125-128.

Савич Екатерина Константиновна, канд. техн. наук, доцент, sav-ich.ek@ssau.ru, Россия, Самара, Самарский университет им. Королева,

Васильева Ирина Павловна, канд. техн. наук, ученый секретарь, доцент, vasileva.ip@ssau.ru, Россия, Самара, Самарский университет им. Королева,

Тарасова Екатерина Александровна, студент, dankness183@gmail.com, Россия, Самара, Самарский университет им. Королева

DIGITAL TOOLS THE PERSONNEL MANAGEMENT PROCESS IN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM E.K.

E.K. Savich, I.P. Vasilyeva, E.A. Tarasova

The article presents a digital HR management toolkit that allows to increase the awareness and competence of employees of manufacturing enterprises in the field of quality management, characterized in that it includes the calculation of KPIs for evaluating the effectiveness and efficiency of personnel. The use of this digital toolkit will reduce the time required to prepare management decisions, eliminate duplicate functions of business processes, strengthen the focus on results of the company's personnel involved in the implementation of key operations, and optimize losses at all stages of production processes.

Key words: digitalization, digital tools, quality management system, business process of the organization, quality management, personnel management, KPI, competence, training, effectiveness.

Savich Ekaterina Konstantinovna, candidate of technical sciences, docent, savich.ek@ssau.ru, Russia, Samara, Samara National Research University named after S.P. Korolev,

Vasilyeva Irina Pavlovna, candidate of technical sciences, Academic Secretary, docent, vasileva.ip@ssau.ru, Russia, Samara, Samara National Research University named after S.P. Korolev,

Tarasova Ekaterina Alexandrovna, student, dankness183@gmail.com, Russia, Samara, Samara National Research University named after S.P. Korolev

УДК 676.012.43
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-214-215

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИЕЙ ОБЯЗАТЕЛЬНЫХ ТРЕБОВАНИЙ СТРАНЫ НАЗНАЧЕНИЯ К ПРОДУКЦИИ

В. Г. Абызов, Ю. И. Денискин, Г. А. Васин

В статье определены причины тенденции по устойчивому росту количества организаций, стремящихся вывести свою продукцию на целевой рынок страны назначения, и приведён перечень основных методов определения обязательных требований страны назначения к продукции. Поставлена цель по проведению анализа метода самостоятельного определения организацией обязательных требований страны назначения к продукции. В целях проведения анализа определены критерии оценки, осуществлены сбор и систематизация информации о методе. На основе опыта организаций представлен обобщённый алгоритм применения метода. Проведён SWOT-анализ метода, в рамках которого определены сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Показаны преимущества и недостатки метода, а также даны рекомендации по повышению эффективности его применения.

Ключевые слова: вывод продукции на внешний рынок, документ об оценке соответствия, система менеджмента качества, система технического регулирования, SWOT-анализ, орган по оценке соответствия, маркировка

На сегодняшний день прослеживается тенденция по устойчивому росту количества организаций, стремящихся вывести свою продукцию на рынок страны назначения [1].

Производители все чаще стремятся выводить свою продукцию на рынок страны назначения, поскольку это позволяет им расширить рынки сбыта, увеличить объёмы производства и валютную прибыль, получить новый импульс для развития.

Государство выигрывает от роста числа организаций, выводящих продукцию на рынок страны назначения, поскольку это стимулирует производство, создаёт новые рабочие места и увеличивает налоговые поступления. Развитие экспорта продукции с высокой добавленной стоимостью является важным условием для устойчивого экономического развития. Правительством Российской Федерации ставится задача по увеличению к 2030 году на две третьих объёма несырьевого неэнергетического экспорта по отношению к уровню прошлого года с выходом на целевое значение порядка 21,12 трлн. рублей [2].

Для вывода продукции на внешний рынок организациям необходимо получить документ об оценке соответствия, подтверждающий соответствие продукции обязательным требованиям страны назначения [3]. Кроме того, в соответствии с положениями стандарта на системы менеджмента качества организация должна определить требования к продукции, в том числе законодательные и нормативные правовые требования, понять, что она может их выполнить и обеспечить их выполнение перед поставкой продукции [4]. Процедура получения документа об оценке соответствия на рынке страны назначения является сложной, сопряжена со значительными финансовыми затратами и объективными трудностями, такими как языковой барьер и отсутствие структурированной, достоверной и полной информации об обязательных требованиях.

Существует несколько методов определения обязательных требований страны назначения к продукции [5]. Перечень основных методов определения обязательных требований страны назначения к продукции приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные методы определения обязательных требований страны назначения к продукции

Название метода	Суть метода
Самостоятельное определение организацией обязательных требований страны назначения к продукции	Уполномоченные сотрудники организации определяют обязательные требования страны назначения к продукции из открытых источников информации
Определение обязательных требований страны назначения через услугу института развития экспорта - РЭЦ	Уполномоченные сотрудники института развития посредством оказания консультационной услуги определяют обязательные требования страны назначения из открытых источников информации
Определение обязательных требований страны назначения через соглашения о взаимном признании и федеральные органы исполнительной власти (ФОИВ), курирующие данные соглашения	Организация обращается в ФОИВ или уполномоченную организацию в рамках реализации соглашения о взаимном признании. В том числе в специальные институты обмена информации об обязательных требованиях к продукции, предусмотренные в рамках Соглашений по техническим барьерами в торговле в рамках Всемирной торговой организации
Определение обязательных требований страны назначения через орган по оценке соответствия в стране назначения	Организация обращается в орган по оценке соответствия в стране назначения для получения информации об обязательных требованиях в стране назначения

Определение обязательных требований страны назначения с помощью партнёров-резидентов, заинтересованных в продукции в стране назначения	Сведения об обязательных требованиях к продукции в стране назначения предоставляет партнёр-резидент в стране назначения

Далее выполним анализ метода самостоятельного определения организацией обязательных требований страны назначения к продукции.

Цель анализа – определение преимуществ и недостатков этого метода при определении обязательных требований страны назначения к продукции.

1. Анализ метода самостоятельного определения организацией обязательных требований страны назначения к продукции.

Для анализа метода определения организацией обязательных требований страны назначения к продукции требуется:

1) Определить критерии оценки метода:

– достоверность и полнота получаемой информации,

– затрачиваемое время на получение информации,

– оценка затрат на получение информации,

– простота использования;

2) Осуществить сбор информации о методе:

– определить основные этапы метода,

– проанализировать необходимые ресурсы,

– выделить особенности метода;

3) Выполнить SWOT-анализ метода [6, 7].

На основе опыта организаций, использовавших метод самостоятельного определения обязательных требований страны назначения к продукции, можно сделать вывод, что уполномоченные сотрудники организации (рабочая группа, созданная в организации) определяют обязательные требования страны назначения к продукции из открытых источников информации по следующему обобщенному алгоритму, включающему следующие действия:

1. Принятие решения на высшем уровне организации о выводе продукции на внешние рынки. Определение ответственного сотрудника или создание рабочей группы с назначением ответственного за координацию и контроль по определению обязательных требований страны назначения к продукции.

Ответственный сотрудник или созданная рабочей группы должны обеспечивать необходимый уровень компетенции и ресурсов для осуществления деятельности.

2. Определение номенклатуры продукции, выпускаемой организацией, и целевых стран назначения, на рынок которых необходимо вывести данную номенклатуру продукцию.

3. Определение обязательных требований целевых стран назначения к продукции через проведение анализа систем технического регулирования.

При анализе системы технического регулирования целевой страны назначения определяется следующее:

– идентификация продукции в системе технического регулирования;

– устанавливаются ли в системе технического регулирования в отношении продукции обязательные требования, в том числе требования к процессам жизненного цикла продукции (например, через требования к системе менеджмента качества организации), маркировке продукции, сопровождающей продукцию документации;

– перечень нормативных правовых актов (НПА), устанавливающих обязательные требования к продукции, и документов по стандартизации, на которые есть ссылка в указанных НПА;

– устанавливаются ли в отношении продукции добровольные требования, при соблюдении которых повышается привлекательность продукции для потребителей или без соблюдения которых продукция становится неконкурентоспособной на рынке целевой страны назначения;

– перечень актов и/или документов по стандартизации, устанавливающих добровольные требования к продукции;

– порядок проведения процедур по оценке соответствия продукции, сроки проведения оценки соответствия и стоимость указанных работ;

– перечень органов по оценке соответствия (органы по сертификации, испытательные лаборатории, органы инспекции и др.), которые могут выдать документы об оценке соответствия, подтверждающие выполнение обязательных требований и при необходимости добровольных требований к продукции.

На данном этапе может быть активно использован инструмент бенчмаркинга, позволяющий организациям изучить опыт конкурентов через анализ их продукции (например, анализ маркировки, упаковки, состава и других характеристик продукции), анализ документации на продукцию (например, документы об оценке соответствия, руководства по эксплуатации, паспорта на продукцию и др. документы) и анализ процедур оценки соответствия (изучение процедур оценки соответствия, проведённых конкурентами, может помочь понять, какие требования необходимо выполнить для получения необходимых документов об оценке соответствия).

4. Обеспечение выполнения обязательных требований страны назначения:

– проведение адаптации продукции, документов на продукцию, документов на процессы производства продукции под требования целевой страны назначения;

– проведение процедур оценки соответствия;

– получение необходимых документов об оценке соответствия.

5. Проведение мониторинга обязательных требований страны назначения.

2. Результаты исследования (анализа метода). Результаты выполненного SWOT-анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты SWOT-анализа метода определения организацией обязательных требований страны назначения к продукции

Сильные стороны	Слабые стороны
– определение самостоятельно сотрудниками обязательных требованиях страны назначения к продукции обеспечивает их глубокое понимание и более эффективное выполнение; – повышение компетенций сотрудников; – независимость от внешних консультаций; – организация полностью контролирует процесс определения обязательных требований страны назначения к продукции; – в долгосрочной перспективе самостоятельный метод определения обязательных требований страны назначения к продукции снижает затраты на постоянное обращение к консультантам.	– риск недостоверности и неполноты полученной информации об обязательных требованиях страны назначения к продукции; – высокая трудоёмкость; – недостаточное понимание языка, законодательства страны назначения и культурных особенностей может привести к ошибкам при определении обязательных требований к продукции; – наличие в штате сотрудников, владеющих языком страны назначения и имеющих компетентность в сфере технического регулирования; – необходимость постоянного мониторинга обязательных требований страны назначения к продукции; – возможная задержка вывода продукции на рынок страны назначения, так как самостоятельное определение обязательных требований страны назначения к продукции может занять больше времени ввиду недостаточной компетенции сотрудников.
Возможности	**Угрозы**
– расширение рынков сбыты продукции; – развитие внутренней компетенции организации; – повышение конкурентоспособности на внутреннем рынке за счёт наличия документов об оценке соответствия обязательным требованиям страны назначения; – улучшение качества и характеристик продукции при адаптации продукции к требованиям страны назначения.	– отказ в таможенном оформлении продукции; – выпуск в обращение продукции, несоответствующей всем обязательным требованиям страны назначения; – санкции и штрафы за выпуск в обращение продукции, несоответствующей обязательным требованиям страны назначения; – возникновение дополнительных затрат на доработку продукции, процессов производства; потеря рынка сбыта при нарушении обязательных требований страны назначения к продукции; – ущерб репутации организации.

Заключение. Выполненное исследование показало, что метод самостоятельного определения организацией обязательных требований страны назначения к продукции – это эффективный, но ресурсоёмкий метод, преимущества которого, в первую очередь, связаны с глубоким пониманием обязательных требований страны назначения к продукции и более эффективным их выполнением, развитием компетенций сотрудников и независимостью от внешних консультантов.

Недостатки метода связаны с высокой трудоемкостью, рисками недостоверности и неполноты полученной информации, рисками совершения ошибок, связанных с недостаточным пониманием языка, законодательства страны назначения и культурных особенностей, рисками получения штрафов и санкций, а также с возможным увеличением времени вывода продукции на рынок страны назначения.

При правильном применении метод позволяет обеспечить выполнение обязательных требований страны назначения к продукции, повысить конкурентоспособность продукции на внутреннем и внешних рынках, улучшить качество продукции при адаптации требованиям страны назначения, а в долгосрочной перспективе – снизить затраты на обращение к консультантам.

По мнению авторов настоящего исследования эффективность метода самостоятельного определения организацией обязательных требований

страны назначения к продукции возможно существенно повысить при его комбинировании с другими методами, приведёнными в таблице 1.

Список литературы

1. Группа Российского экспортного центра в 2023 году поддержала 24 тысячи компаний // Российский экспортный центр [Электронный ресурс] URL: https://www.exportcenter.ru/presscenter/gruppa-rets-v-2023-godu-pod-derzhala-24-tysyachi-kompaniy (дата обращения: 16.01.2025).

2. Михаил Мишустин провёл стратегическую сессию по национальному проекту «Международная кооперация и экспорт // Правительство Российской Федерации [Электронный ресурс] URL: http://government.ru/news/52362 (дата обращения: 16.01.2025).

3. Agreement on Technical Barriers to Trade // World Trade Organization. Женева. [Электронный ресурс] URL: https://www.wto.org/english/docs e/legale/tbte.htm (дата обращения: 16.01.2025).

4. ГОСТ Р ИСО 9001–2015, идентичный международному стандарту ИСО 9001:2015 «Системы менеджмента качества. Требования» (ISO 9001:2015 «Quality Management Systems – Requirements», IDT), утверждён и введён в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 сентября 2015 года N 1391-ст.

5. Release of Products into Circulation on the Foreign Market, Taking into Account Compliance with the Mandatory Requirements of the Country of Destination / Valery Abyzov, Yury Deniskin et al. // E3S Web of Conf. 458 05035 (2023). – DOI: 10.1051/e3sconf/202345805035.

6. MBA. TOOLS. Всё о SWOT-анализе. Litres, 2023.

7. Sarsby Alan. SWOT Analysis. Lulu Press, 2016. 86 p.

Абызов Валерий Геннадьевич, аспирант, abyzov@list.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Денискин Юрий Иванович, д-р техн. наук, профессор, yurideniskin@gmail.com, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Васин Григорий Александрович, студент, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

THE METHOD OF DETERMINING BY THE ORGANIZATION THE MANDATORY REQUIREMENTS OF THE COUNTRY OF DESTINATION FOR PRODUCTS

V.G. Abyzov, Y.I. Deniskin

The article identifies the reasons for the trend of steady growth in the number of organizations seeking to bring their products to the target market of the destination country and provides a list of the main methods of determining the mandatory requirements of the destination country to the products. The objective is to analyze the method of self-determination of mandatory requirements of the destination country to the products by the organization. In order

to carry out the analysis, the evaluation criteria are defined, the information on the method is collected and systematized. The generalized algorithm of the method is presented on the basis of the experience of the organizations. The SWOT analysis of the method is carried out, within the framework of which the strengths and weaknesses, opportunities and threats are determined. The advantages and disadvantages of the method are shown and recommendations for improving the effectiveness of its application are given.

Key words: product introduction to the foreign market, conformity assessment document, quality management system, technical regulation system, SWOT-analysis, conformity assessment body, labeling.

Abyzov Valery Gennadievich, postgraduate, abyzov@list.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Deniskin Yury Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, yuri-deniskin@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Vasin Grigory Alexandrovich, student, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)

УДК 658.16
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-220-221

МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ МАЛОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В ПРОЦЕССЕ ДИВЕРСИФИКАЦИИ

В.Ю. Рогов, П.А. Лонцих, О.М. Сафонова, А.Е. Пашков

В статье предложена трактовка производственной диверсификации как формы организации производства, позволяющей снизить риски производственной деятельности предприятия и повысить его устойчивость в условиях стратегической и рыночной неопределенности, а также как предпосылки формирования производственных кластеров. Предложено сформировать кластер на основе «якорных» предприятий. Выявлено, что основной причиной неудовлетворительного экономического положения малых машиностроительных предприятий-смежников сборочных авиационных корпораций является их низкая загруженность. Для предприятия АО «ПРОМТЕХ-Иркутск» предложены направления- проекты диверсификации. Сформулирован методический подход оценки рисков малых машиностроительных предприятий на основе факторного подхода экспертной оценки в процессе диверсификации, заключающийся в последовательном снижении дискретных стратегических рисков (в том числе рисков стратегических решений) и уровня непрерывной рыночной неопределенности. Разработана и апробирована схема оценки рисков, реализующая указанный подход, включая оценку рисков с применением метода Монте-Карло.

Ключевые слова: диверсификация, метод анализа иерархий, метод Монте-Карло, организация производства, риски.

В исследованиях, посвященных проблемам производственной диверсификации, диверсификация рассматривается как метод снижения рисков и как инструмент обеспечения устойчивости развития предприятия [1-4]. В изученных научных трудах отмечается, что процесс диверсификации

в качестве инструмента минимизации рисков представляет интерес, но при этом, применять его можно только для рисков, не обладающих высокой степенью убыточности и возникновения.

Различают 2 вида диверсификации как метода - связанная и несвязанная. Связанная диверсификация выступает в качестве нового вида деятельности предприятия, которая в свою очередь, связана с областями бизнеса (производство, маркетинг, материально-техническое обеспечение и т.д.). Связанная диверсификация делится еще на 2 типа - вертикальный и горизонтальный.

В машиностроении процессы вертикальной интеграции и, в данном случае, процессы вертикальной диверсификации связаны не столько с получением новых видов продукции из некоего общего исходного сырья, сколько с новыми технологиями производства, освоением новых технологических процессов и выпуском новых видов продукции в качестве комплектующих, оснастки, инструментов.

Стратегия процесса горизонтальной диверсификации представляет собой покупку или производство новых продуктов, которые возможно поставлять текущим потребителям или клиентам предприятия. Использую данную стратегию, предприятие делает упор на имеющимся уровне продаж и технологии производства. При этом минимизация рисков происходит за счет повышения разнообразия предоставляемого товара. Если же какой-либо тип продукции понизит свою привлекательность, то предприятие все равно будет располагать ассортиментом, позволяющим получать стабильный доход [2].

Корректировка ассортимента в рамках объединения может осуществляться не только в процессе прямого слияния-поглощения, но также и в рамках договоров о сотрудничестве, например, при формировании отраслевых кластеров на данной территории.

Для проведения моделирования рисков рассмотрим малое высокотехнологичное машиностроительное предприятие АО «ПРОМТЕХ-Иркутск», которое является одним из представителей кластера и связанных с ними предприятий, обеспечивающих «якорные предприятия» комплектующими. Между основными предприятиями к настоящему времени сложились разнообразные кооперационные связи (производство изделий из композиционных материалов и др.). Развивая процессы горизонтальной диверсификации на малых обслуживающих предприятиях, возможно развитие кооперации при производстве выпускаемой продукции.

В ходе работы с предприятием нами установлено, что ключевыми стратегическими целями АО «ПРОМТЕХ-Иркутск» являются обеспечение высокого качества продукции через сертификацию и подтверждение соответствия, повышение надежности и долговечности выпускаемых изделий, снижение затрат и повышение эффективности производственных процессов, разработка гибких решений, адаптированных под индивидуальные потребности заказчиков, обеспечение стабильного финансового положения и достаточного уровня рентабельности.

Данные цели интегрированы в процесс управления рисками АО «ПРОМТЕХ-Иркутск», которые были выявлены нами с участием менеджера по качеству и заместителя директора по производству предприятия, проанализированы и проранжированы, как ключевые, стратегические риски, влияющие на цели и функционирование предприятия, среди которых на первом месте по вероятности и тяжести последствия находятся технологические, операционные и рыночные риски, реализация которых может нанести большой ущерб предприятию. В качестве предупреждающих мер для управления данными рисками нами предложены к рассмотрению направления, связанные с диверсификацией деятельности, ориентированной на обеспечение потребностей как предприятий, так и внешних заказчиков. Целью последующих исследований являлось выявление путей стабильности и успешности для АО «ПРОМТЕХ-Иркутск», его конкурентоспособность, востребованность продукции, а также (за счет установки высокопроизводительного универсального оборудования, позволяющего выполнять заказы от основных предприятий-заказчиков) минимизация финансовых рисков и достижение экономии. Для АО «ПРОМТЕХ-Иркутск» рассмотрены следующие направления диверсификации:

1. Использование в трубогибочном производстве современных автоматизированных универсальных станков,

2. Производство 3D-изделий различного профиля для производства технологической оснастки и инструмента (из металлических материалов),

3. Производство электронных узлов на заказных печатных платах с применением автоматизированных сборочных комплексов.

При проведении данного исследования особое значение имеет анализ диверсификации как форма организации производства. По утверждению ряда специалистов, диверсификация является формой организации производства, проявляющееся в расширении номенклатуры продукции, в отличие от диверсификации-стратегии при которой расширение номенклатуры связано с новыми рынками [6].

Диверсификация рассматривается нами как форма организации производства, основанная на сочетании множественной специализации, позволяющей снизить риски хозяйственной деятельности предприятия и повысить его устойчивость в условиях стратегической и рыночной неопределенности, а также как предпосылка формирования производственных кластеров.

Взаимодействие малых предприятий-подрядчиков крупных компаний, входящих в кластер, осуществляющих диверсификацию производства следует рассматривать как процесс горизонтальной диверсификации, понимая горизонтальную интеграцию не только в продуктовом, но и в территориальном аспекте.

В корпорации (холдинге) АО «Промтех» в рамках диверсификации производства ведутся, в частности, работы по проектированию высокотехнологичного оборудования морских надводных и подводных аппаратов, оборудования для газовой добычи, производства резинотехнических

изделий. Следовательно, реализация политики диверсификации в структурных подразделениях следует считать обоснованной.

АО «Промтех-Иркутск» - малое машиностроительное предприятие, учрежденное корпорацией «Промышленные технологии» в 2016 г., является подрядчиком завода по производству трубопроводной и кабельной оснастки.

Перейдем к применению метода анализа иерархий (МАИ).

Нами выполнена сравнительная оценка выявленных трех (из первоначальных четырех) проектов, используя известный алгоритм метода анализа иерархий, который строится на основе экспертных оценок.

Метод анализа иерархий (МАИ), широко используемый в принятии решений, представляет собой теорию, которая базируется на экспертных оценках и суждениях индивидуальных участников или групп. МАИ позволяет лицу, принимающему решение (ЛПР), структурировать сложную проблему в виде иерархии и выполнить количественную оценку имеющихся вариантов решения (альтернатив). В исходном виде МАИ подразумевает использование оригинального подхода Т. Саати для вычисления относительной значимости признаков и формирования оценок относительной значимости альтернатив в разрезе признаков, а также использование принципа большинства для итогового расчета весов альтернатив.

Алгоритм применения метода анализа иерархий имеет следующую последовательность:

1. Применение метода анализа иерархий начинаем с выбора альтернатив, из которых с помощью данного метода будет выбираться оптимальная.

2. Затем задаем критерии (факторы, параметры), по которым будут оцениваться выбранные альтернативы. Для решения разных задач может быть выбрано множество различных критериев.

3. Для выявления количественных показателей при рассмотрении значимости различных критериев в методе анализа иерархий предложена следующая шкала относительной важности: от 1 – равная значимость, 3 – средняя степень превосходства, 5 – умеренно сильное превосходство, 7 – весьма значительное превосходство, до 9 – абсолютное превосходство и 2, 4, 6, 8 – соответствующие промежуточные значения.

4. Для оценки достоверности представленных исходных данных рассчитывается индекс согласованности (ИС). Для этого рассчитывается показатель согласованности (ПС) равный сумме произведений суммарной оценки параметра на его вес. После ПС рассчитываем индекс согласованности, отражающий степень правильности экспертной информации.

$$ИС = (ПС-n)/(n-1),$$

где n – количество параметров.

СС – случайная согласованность.

Тогда относительная согласованность, по которой судят о правильности суждения ОС = ИС/СС. Если индекс ОС <0.1, то полученный результат по определению приоритетов достоверен. В противном случае группе

экспертов необходимо более подробно исследовать задачу, проверить свои суждения, уточнить статистические данные или провести новые эксперименты.

5. Производится построение матриц попарных сравнений альтернатив по каждому из параметров, также как на этапе 7. Для каждой матрицы рассчитывается показатель согласованности, индекс согласованности и относительная согласованность, также как на этапе 8.

6. Составляется сводная таблица, в которую входят все оценки альтернатив по всем параметрам, веса параметров, а также рассчитываются веса оценок, путем умножения оценки альтернативы на вес параметра. На основе полученных данных, путем суммирования весов оценок получается балльный показатель, отражающий рейтинг альтернатив по решаемой проблеме. Наибольший из получившихся рейтингов будет у самого оптимального по МАИ варианта из имеющихся альтернатив.

В исследуемом процессе парных сравнений нами использованы следующие критерии:

К1 – потенциальный уровень внешнего рынка (сторонних потребителей, вне сложившейся производственной цепочки);

К2 – уровень инвестиционных затрат на единицу продукции;

К3 – стабильность внешнего рынка (наличие долгосрочного спроса).

Проведенные расчеты в среде матричного процессора EXCEL позволили получить следующие результаты (табл.1.):

Таблица 1

Сравнительное математическое ожидание реализации проектов

	X1	X2	X3	X4	MO
K1	0,524	0,379	0,573	0,578	0,5135
K2	0,134	0,331	0,347	0,263	0,26875
K3	0,342	0,289	0,079	0,159	0,21725

Из табл.1 следует, что проект №1 получил математическое ожидание реализации в рассматриваемом ряду 51,4%, проект №2 – 26,9%, проект №3 – 21,7% для минимизации технологических и стратегических ТОП-рисков АО «Промтех-Иркутск».

Далее перейдем к оценке проектов с использованием комбинированного метода анализа иерархий и Монте-Карло. Полученные нами на предыдущем этапе экспертные оценки и результаты попарных сравнений подвергаются флуктуациям в некоторых пределах с целью выяснения устойчивости полученных значений компонентов ранжированного ряда. Для обеспечения возможности варьирования полученных экспертных оценок использовался «плавающий» стохастический множитель (коэффициент вариации), определяющий разброс значений экспертных оценок в 10% как в сторону увеличения, так и уменьшения (табл.2).

Проведенные авторами статистические эксперименты показывают, что последовательность значений, определяющих приоритетность проектов в целом не изменяется. Наблюдается в единичных случаях смена величины математического ожидания по критериям К2 и К3 по проектам №2 и №3.

Проведенный анализ с использованием имитационного моделирования указывает на целесообразность последующего сравнительного анализа первых двух проектов (расширение трубогибочного производства и производство металлических изделий методом 3D-печати).

Таблица 2

Сопоставление экспертных оценок проектов

	X1	X2	X3	X4	MO
K1	0,51501369	0,38383828	0,56547393	0,56830168	0,50815689
K2	0,13977196	0,32421797	0,35186763	0,26611042	0,27049199
K3	0,34521435	0,29194375	0,08265844	0,1655879	0,22135111

Как и при анализе с применением постоянных (не стохастических) значений параметров проектов, основным фактором, влияющим на величину NPV, является выручка от продаж. При указанных изменениях, вероятность того, что NPV проекта примет отрицательное значение, составляет 27%.

Имитационный анализ проекта №2 (3-D принтеры). При снижении объема продукции на 40% и снижении цены на 40%, из 500 случаев генерации, отрицательное значение NPV наблюдается в 402 случаях (80%), что свидетельствует о сравнительно меньшей надежности проекта №2. Тот же вывод был сделан и при проведении расчетов на ППП INVEST.

Удовлетворительные результаты получены при возможном снижении цены на 10% и снижении объема услуг на 17%.

Как и при анализе с применением постоянных (не стохастических) значений параметров проектов, основным фактором, влияющим на величину NPV, является выручка от продаж. При указанных изменениях, вероятность того, что NPV проекта примет отрицательное значение, составляет 27%.

Имитационный анализ проекта №2 (3-D принтеры). При снижении объема продукции на 40% и снижении цены на 40%, из 500 случаев генерации, отрицательное значение NPV наблюдается в 402 случаях (80%), что свидетельствует о сравнительно меньшей надежности проекта №2. Тот же вывод был сделан и при проведении расчетов на ППП INVEST.

Удовлетворительные результаты получены при возможном снижении цены на 10% и снижении объема услуг на 17%.

При указанных возможных вариациях цены и объемов производства отрицательное значение NPV наблюдалось в 35% случаев.

В практике системного менеджмента известен стандарт ГОСТ Р 66.0.01-2017 «Оценка опыта и деловой репутации субъектов предпринимательской деятельности» [7,8], согласно которому каждое предприятие, нацеленное на серьезное и успешное развитие, должно соответствовать таким критериям, как продолжительность присутствия на рынке, наличие для работы необходимых ресурсов, финансовая независимость, высокий уровень квалификации и опыта сотрудников, лояльность клиентов, достоверность и полнота предоставляемых данных о компании. Для оценки опыта и деловой репутации используется факторная модель экспертной оценки.

Таким образом, направление (проект) диверсификации, связанный с развитием трубогибочного производства на АО «Промтех-Иркутск» следует признать приоритетным.

Список литературы

1. Мамаев А.А. Диверсификация производственной деятельности предприятия как фактор его устойчивого развития // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2020. № 4А. С. 337-344.

2. Андреев Д.А. Обзор подходов к диверсификации предприятий оборонно-промышленного комплекса // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Том 13. № 6А. С. 59-69.

3. Абрамов Д.В. Выбор эффективности диверсификации производства в условиях цифровизации // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2023- С. 7-14.

4. Денисова Н.И., Губанов Р.С., Луковникова Н.С. Диверсификация и ее роль в системе методов управления рисками // Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление, 2014, С. 42-45.

5. Смирнова Г.П., Стрельников А.Г. Диверсификация и малое предпринимательство как фактор экономического развития // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2009.№3 (7). С.93 - 106].

6. Белоусова В.М. Диверсификация как стратегия развития и форма организации производства // Дискуссия. Журнал научных публикаций. 2013. №11(41). - С.44-51.

7. Стандарт ГОСТ Р 66.0.01-2017 «Оценка опыта и деловой репутации субъектов предпринимательской деятельности».

8. Лонцих, П.А. Управление рисками на основе методов диакоптики при синтезе виброактивного оборудования высокотехнологичного предприятия / П.А. Лонцих, Н.П. Лонцих, Е.Ю. Головина, А.В. Федотова // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 3 (59). С. 38-45.

9. Джонсон Д., Шоулз К., Уиттингтон Р. Корпоративная стратегия. М., СПб, Киев: Издательский дом «Вильямс», 2007. 800 с.

Рогов Виктор Юрьевич, д-р экон. наук, профессор, rogovvu@mail.ru, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Лонцих Павел Абрамович, д-р техн. наук, профессор, palon@list.ru, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Сафонова Ольга Михайловна, аспирант, olyastefanovskaya@mail.ru, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Пашков Андрей Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, директор Института авиамашиностроения и транспорта, pashkov@istu.edu, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет

MODELING THE RISKS OF AN AUTOMOBILE ENGINEERING ENTERPRISE IN THE PROCESS OF DIVERSIFICATION

V.Yu. Rogov, P.A. Lontsikh, O.M. Safonova, A. E. Pashkovo

The article offers an interpretation of production diversification as a form of production organization that allows reducing the risks of the enterprise's economic activity and increasing its stability in the conditions of strategic and market uncertainty, as well as a prerequisite for the formation of production clusters. It is proposed to form the cluster on the basis of "anchor" enterprises. The main reason for the unsatisfactory economic situation of small machine-building enterprises-associates of assembly aviation corporations is their low workload. For the enterprise "Techprom-Irkutsk" diversification projects are proposed. A methodological approach has been formulated for assessing the risks of small machine-building enterprises based on the factor approach of expert assessment in the process of diversification, which consists in a consistent reduction of discrete strategic risks (including the risks of strategic decisions) and the level of continuous market uncertainty. A risk assessment scheme has been developed and tested that implements the specified approach, including: the use of the "game with nature" model, the application of the hierarchy process analysis method in combination with the statistical testing method, using the Monte Carlo method.

Key words: diversification, hierarchy analysis method, Monte Carlo method, production organization, risks.

Rogov Viktor Yurievich, doctor of economics sciences, professor, rogovvu@mail.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University,

Lontsikh Pavel Abramovich, doctor of technical sciences, professor, palon@list.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University,

Safonova Olga Mikhailovna, postgraduate, olyastefanovskaya@mail.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University,

Pashkov Andrey Evgenievich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, director of the institute of aircraft engineering and transport, pashkov@istu.edu, Russia, Irkutsk, Irkutsk Polymer Plant LLC

УДК 519.876.2:658.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-228-229

ОБОСНОВАННОЕ ЦЕЛЕПОЛАГАНИЕ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко, С.А. Шеметюк, П.А. Козлов

Разработан подход к обоснованному целеполаганию в области качества промышленного предприятия, позволяющий управлять достижимостью поставленных целей в области качества посредством управления эффективностью деятельности задействованных в их достижении подразделений организации. Апробация подхода проведена на примере деятельности фармацевтического предприятия. Для рассматриваемого предприятия разработана математическая модель обеспечения достижимости поставленных групп целей в области качества.

Ключевые слова: цели в области качества, целеполагание, достижимость, эффективность работы, вероятность.

В цикле работ [1-5] авторами разработан подход к описанию комплексного взаимодействия социально-экономических, организационных и технических подсистем промышленного предприятия при управлении качеством в пространстве состояний процессов. Была проведена апробация разработок на примере нескольких промышленных предприятий. Результатами этих работ являются выявленные закономерности управления рассматриваемыми подсистемами при целенаправленной деятельности предприятия в области качества, а также полученные на их основе функциональные модели в области целеполагания предприятий, успешно прошедшие верификацию.

В исследовании [6] разработан подход к использованию функциональной модели IDEF0 при расчете рисков для сети взаимосвязанных и взаимодействующих процессов. Представление деятельности по достижению целей в области качества предприятия как сети взаимосвязанных и взаимодействующих процессов позволяет использовать предложенный подход при прогнозировании достижимости поставленных целей.

Для достижения целей в области качества подразделения-исполнители используют свой имеющийся потенциал (технологические, человеческие, информационные, временные и пр. ресурсы) целиком или частично. Однако имеющийся потенциал подразделений может не соответствовать требуемому уровню потенциала, необходимому для полного обеспечения выполнения поставленных целей.

Задачей настоящей работы является исследование обеспечения достижимости целей в области качества предприятия посредством управления эффективностью деятельности его подразделений-исполнителей, принимающих участие в работах над достижением поставленных целей. В качестве примера рассмотрим деятельность фармацевтического предприятия.

ФКП «Курская биофабрика – фирма «БИОК» является старейшим предприятием Курской области, стратегически важным, одним из ведущих в РФ производителей средств диагностики и профилактики инфекционных болезней животных. В настоящее время биофабрика занимается производством следующей продукции [7]:

– ветеринарной иммунобиологической продукции: диагностикумов туберкулеза, лейкоза, сапа, бруцеллеза, сальмонеллеза, гриппа, парагриппа, респираторно-синцитиальной инфекции крупного рогатого скота и др. (производство ветеринарной продукции, ПВП);

– свыше 30-ти наименований лекарственных препаратов медицинского применения для инъекционной и инфузионной терапии различных фармацевтических групп (производство медицинской продукции, ПМП);

– напитков, экстрактов, настоев, морсов, сиропов и пр. (производство напитков и экстрактов, ПНЭ).

Процессы производства лекарственных средств организованы по принципу единого технологического цикла, начинающегося с получения воды для инъекций и заканчивающегося операциями по упаковке готовой продукции. Производство укомплектовано современным технологическим оборудованием мирового уровня. Контроль качества продукции на всех этапах производства осуществляют собственные аналитические лаборатории предприятия.

Выпускаемая БИОК продукция поступает не только на внутренний рынок страны, но и на международный рынок, поэтому к качеству выпускаемой продукции на предприятии предъявляются особые требования, выполнение которых обеспечивается действующей интегрированной системой менеджмента качества (ИСМК). Предприятие неоднократно получало сертификаты соответствия ИСМК требованиям ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ Р ИСО 14001 и ГОСТ Р ИСО 22000. Однако с широким распространением в фармацевтической деятельности правил GMP – правил надлежащей производственной практики (системы требований и правил, установленных для производства лекарственных средств медицинского и ветеринарного применения), необходимость в добровольном подтверждении соответствия ИСМК стандартам ИСО утратила актуальность, т.к. требования системы GMP являются более детальными и распространяются на: систему обеспечения качества, персонал, помещения и оборудование, документацию, производство продукции, контроль качества, рекламации и отзыв продукции, проведение самоинспекций, а также многие другие аспекты производственной фармацевтической деятельности.

Впервые ФКП «Курская биофабрика» получило сертификат соответствия производства лекарственных средств для ветеринарного применения требованиям ГОСТ Р 52249-2009 «Правила производства и контроля качества лекарственных средств», который идентичен Правилам производства лекарственных средств для человека и животных Европейского Союза (EC Guide to Good Manufacturing Practice for Medicinal Products for Human and Veterinary Use) для производства туберкулинов. С тех пор соответствие

ветеринарного производства предприятия требованиям стандарта подтверждается каждые 3 года.

Заключение о соответствии производства лекарственных средств для медицинского применения требованиям ГОСТ Р 52249-2009 предприятие впервые получило в 2020 г. С этого времени ведется постоянная работа по обеспечению и соблюдению требований GMP, в том числе с учетом введенных изменений в Правила надлежащей производственной практики Евразийского экономического союза.

Предприятие имеет широкую линейно-функциональную организационную структуру, отражающую иерархический тип управления ФКП «Курская биофабрика».

Для решения поставленной в настоящей работе задачи рассмотрены утвержденные высшим руководством биофабрики цели в области качества, поставленные в период с 2014 г. по 2023 г. При этом следует отметить, что предприятие отдельно ставило цели в области экологии, в рамках данной работы подробно не рассматриваемые.

Всего за указанный период было поставлено более 120-ти общих целей в области качества, касающихся всех производств (в работе не рассматриваются цели, поставленные для конкретных подразделений).

Проведенный анализ поставленных целей позволил объединить их в следующие группы в зависимости от направления деятельности:

ГЦ1 – группа целей, посвященных обеспечению поставок лекарственных препаратов (для медицинского и ветеринарного применения), в т.ч. обеспечению оптимального соотношения цена/качество;

ГЦ2 – группа целей, посвященных обеспечению соответствия ПВП требованиям GMP;

ГЦ3 – группа целей, посвященных обеспечению соответствия ПМП требованиям GMP;

ГЦ4 – группа целей, посвященных обеспечению соответствия ИСМК предприятия требованиям ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ Р ИСО 14001, ГОСТ Р ИСО 22000;

ГЦ5 – группа целей, посвященных проведению валидации и квалификации фармацевтического производства;

ГЦ6 – группа целей, посвященных обеспечению закупок оборудования и автоматизации производств;

ГЦ7 – группа целей, посвященных проведению реконструкции производственных помещений, монтажа и ввода в эксплуатацию нового производственного оборудования;

ГЦ8 – группа целей, посвященных разработке и внедрению новых препаратов и рецептур напитков;

ГЦ9 – группа целей, посвященных проведению научных исследований (в т.ч. разработке методик испытаний);

ГЦ10 – группа целей, посвященных обеспечению деятельности по лицензированию производств, аккредитации лабораторий, государственной регистрации лекарственных препаратов.

Рейтинги групп целей распределились следующим образом в зависимости от N – количества целей, поставленных в год в рамках одной группы (рис. 1):

– стабильный рейтинг имеют группы целей: ГЦ1, ГЦ2, ГЦ9;

– снижение рейтинга наблюдается для групп: ГЦ4, ГЦ7, ГЦ10;

– рост рейтинга наблюдается для групп: ГЦ3, ГЦ5, ГЦ6, ГЦ8.

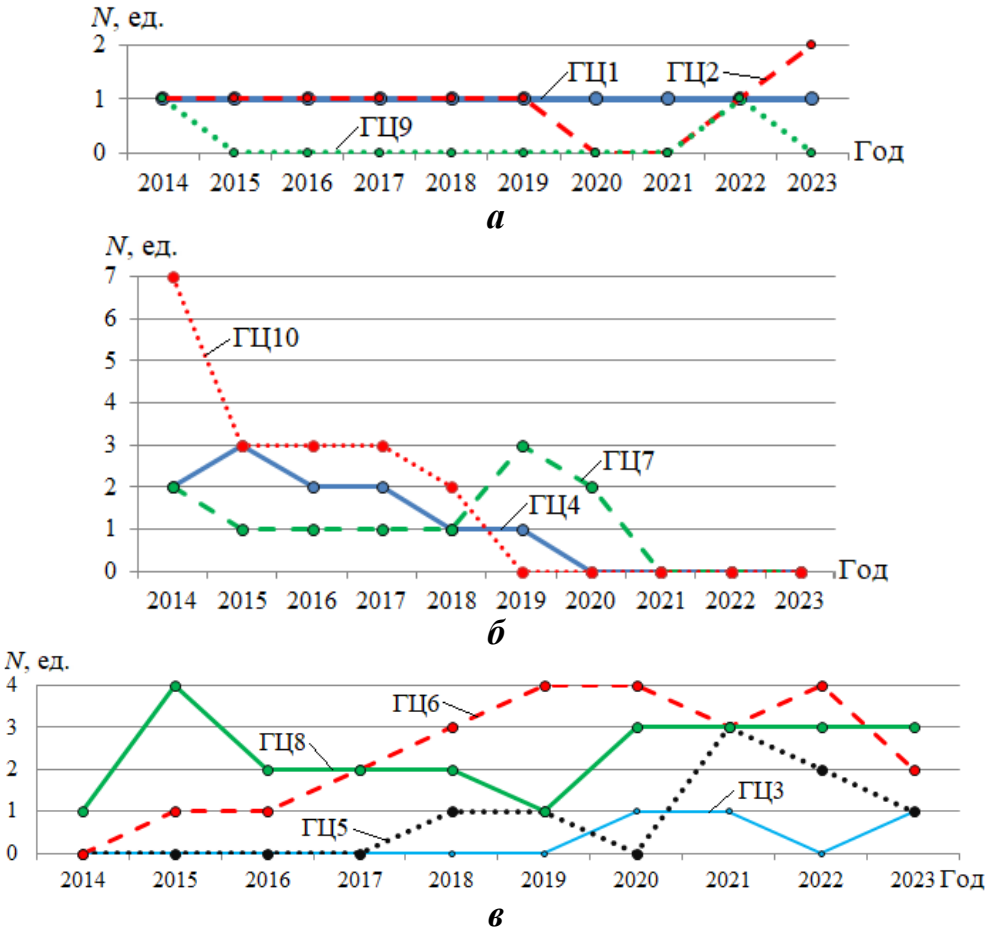


Рис. 1. Рейтинги групп целей в области качества предприятия: а - стабильный рейтинг; б - снижение рейтинга; в - рост рейтинга

Стабильные рейтинги групп целей обусловлены следующими причинами:

– для ГЦ1 – постоянством выдвигаемой цели: предприятие должно обеспечивать поставку продукции для медицинского и ветеринарного применения с представлением потребителям наиболее выгодных условий закупки биопрепаратов в соотношении цена/качество;

– для ГЦ2 – постоянством выдвигаемой цели: предприятие должно систематически подтверждать соответствие СМК применительно к производству лекарственных средств для ветеринарного применения требованиям ГОСТ Р 52249-2009;

– для ГЦ9 – возросшей сложностью выполнения требований к проведению современных конкурентных научных исследований, сложностью выделения дополнительных финансовых средств на их проведение.

Снижение рейтингов групп целей в области качества обусловлены следующими причинами:

– для ГЦ4 – отсутствием необходимости обязательного подтверждения соответствия ИСМК предприятия требованиям ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ Р ИСО 14001, ГОСТ Р ИСО 22000, сложностью и нецелесообразностью выделения дополнительных финансовых средств на добровольное подтверждение соответствия;

– для ГЦ7 – осуществлением уже к 2020 году всех необходимых реконструкционных работ для соответствия производственных помещений требованиям GMP, а также осуществлением монтажа и ввода в эксплуатацию критического производственного оборудования;

– для ГЦ10 – переводом к 2019 году деятельности по лицензированию производств, государственной регистрации лекарственных препаратов в рутинные задачи, а также отсутствием необходимости аккредитации лабораторий.

Рейтинги групп целей: ГЦ3, ГЦ5, ГЦ6, ГЦ8 с 2019-2020 гг. возросли в связи с необходимостью подтверждения соответствия ПМП требованиям GMP, связанной с этим необходимостью проведения валидационных и квалификационных работ, автоматизации производства (влекущей за собой закупку дополнительного контрольного оборудования), а также в связи с необходимостью расширения рынка сбыта для выпускаемой на предприятии продукции.

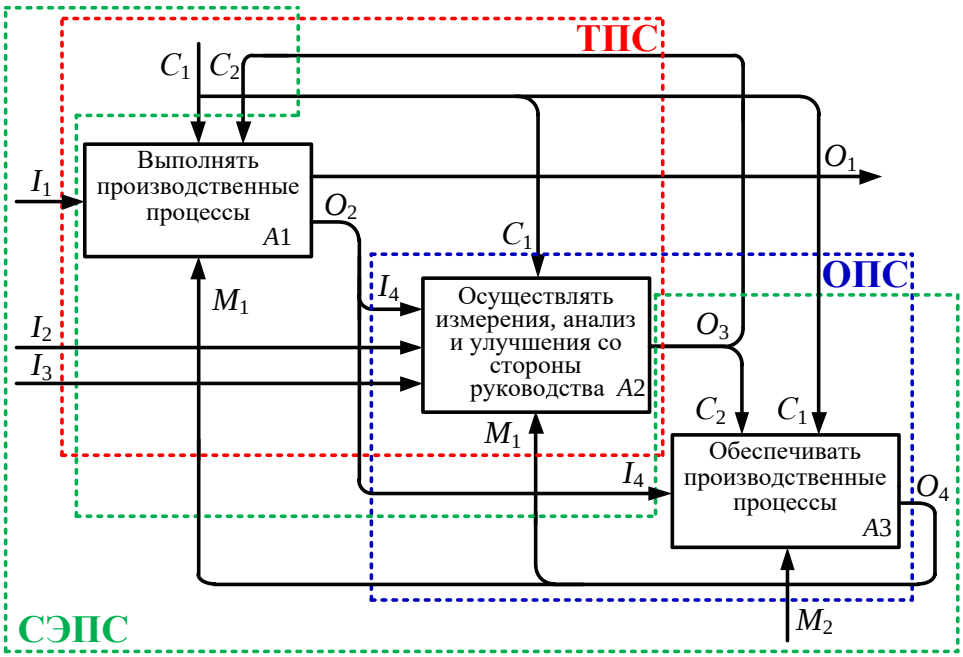


Рис. 2. Декомпозиция процесса A0 «Производить промышленную продукцию» в нотации IDEF0

Все рассматриваемые цели предприятия в области качества достигаются в ходе выполнения процесса *A*0 «Производить промышленную продукцию» при взаимодействии социально-экономической (СЭПС), орга-

низационной (ОПС) и технической (ТПС) подсистем предприятия [5, 6]. На рис. 2 представлена декомпозиция процесса *A*0 в нотации *IDEF*0, разработанная согласно теории менеджмента [8-10], в которой все протекающие на предприятии процессы разделены на три вида: основные процессы (процессы производства) – процесс *A*1 «Выполнять производственные процессы», процессы управления (менеджмента) – процесс *A*2 «Осуществлять измерения, анализ и улучшения со стороны руководства», обеспечивающие процессы – процесс *A*3 «Обеспечивать производственные процессы».

На схеме приняты следующие обозначения связей «вход», «управление», «выход», «механизм»: I_1 – сырье, материалы, упаковка, комплектующие; I_2 – требования заинтересованных сторон; I_3 – показатели удовлетворенности заинтересованных сторон; C_1 – нормативно-техническая и законодательная документация; O_1 – готовая продукция; $O_2 = I_4$ – показатели качества процессов жизненного цикла продукции (ЖЦП) и готовой продукции; $O_3 = C_2$ – управленческие решения (например, планы улучшения показателей качества процессов и продукции); $O_4 = M_1$ – распределенные ресурсы; M_2 – человеческие, технические, финансовые и другие ресурсы.

Рассмотрим участие подразделений ФКП «Курская биофабрика» в каждом из процессов *A*1-*A*3.

Основные производственные процессы осуществляются на производствах: ПВП, ПМП, ПНЭ.

Процессы менеджмента, т. е. общее управление всеми процессами производств (в т. ч. разработку внутренних распорядительных документов), осуществляет высшее руководство биофабрики (директор и заместители директора), а также:

– уполномоченные лица ПВП и ПМП;
– главный инженер (руководитель службы главного инженера);
– руководитель службы качества;
– руководитель административно-хозяйственной службы;
– главный технолог (руководитель отдела главного технолога);
– начальник ветеринарно-санитарного отдела;
– начальник планово-экономического отдела;
– начальник отдела кадров.

Обеспечение производственных процессов на предприятии целесообразно разделить на две группы: на общее обеспечение и обеспечение основных производственных процессов. Общее обеспечение осуществляют следующие структурные подразделения:

– отдел охраны окружающей среды (входит в службу главного инженера);

– служба охраны труда и промышленной безопасности (также входит в службу главного инженера);

– ветеринарно-санитарный отдел;

– штаб ГО и ЧС,

а также другие подразделения, не участвующие в процессах менеджмента, основных производственных процессах, а также в прямом обеспечении производственных процессов (например, цех общественного питания, музей, бюро пропусков и др.).

Обеспечением основных производственных процессов занимаются следующие подразделения предприятия:

П1 – отдел главного энергетика, входит в службу главного инженера;

П2 – отдел главного механика, входит в службу главного инженера;

П3 – отдел автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), входит в службу главного инженера;

П4 – административно-хозяйственная служба;

П5 – отдел транспортной логистики, включающий: центральный склад; склад продукции для медицинского применения; участок реализации лекарственных средств для ветеринарного применения; участок по изготовлению ампул и тары; транспортный цех;

П6 – подсобно-производственное сельское хозяйство;

П7 – служба качества, включающая: отдел обеспечения качества; отдел контроля качества; отдел биологического технологического контроля; лабораторию входного контроля;

П8 – отдел главного технолога;

П9 – отделение водоподготовки, входящее в производство ветеринарных препаратов;

П10 – юридический отдел;

П11 – контрактная служба (осуществляет закупочную деятельность);

П12 – коммерческая служба (осуществляет продажную деятельность).

Следует отметить, что для дальнейшего удобства некоторые подразделения биофабрики были либо выделены из одной службы (например, отделы главного энергетика, главного механика, АСУТП из службы главного инженера), либо наоборот, объединены (например, подразделения отдела транспортной логистики, отделы службы качества). Такой подход выбран как наиболее рациональный для изучения эффективности деятельности рассматриваемых подразделений при достижении целей предприятия в области качества, т.к. позволяет либо разделить, либо объединить функциональные обязанности отделов, входящих в одну службу, в зависимости от требуемого уровня детализации.

Именно сотрудники подразделений П1-П12 являются движущей силой при достижении поставленных целей предприятия, именно их потенциал и сопротивление являются ключевыми при расчете общего потенциала / сопротивления предприятия. В табл. 1 представлена матрица участия подразделений, обеспечивающих основные процессы производства биофабрики (подразделений-исполнителей), в работах по достижению

каждой группы целей в области качества, а также доля участия E_{ij} каждого j-ого подразделения в работах над достижением i-ой группы целей, т.е. фактический потенциал каждого подразделения.

Таблица 1

Матрица участия подразделений-исполнителей БИОК в работах по достижению целей в области качества

Группа целей ГЦ*i*	Подразделение, П*j*											
	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10	П11	П12
ГЦ1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ГЦ2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ГЦ3	+	+	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+
ГЦ4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ГЦ5	–	+	+	–	+	–	+	+	+	–	–	–
ГЦ6	+	+	+	+	+	–	+	+	–	+	+	–
ГЦ7	+	+	+	+	–	–	+	+	–	–	+	–
ГЦ8	–	–	–	–	–	–	+	+	–	+	+	+
ГЦ9	–	–	–	–	–	+	+	+	–	+	+	+
ГЦ10	–	–	+	–	–	–	+	+	–	+	–	–
Фактический потенциал, E_{ij}, %	60	70	80	60	60	40	100	100	50	80	80	60

При этом следует обратить внимание, что малые значения фактического потенциала подразделения (например, $E_9 = 50\%$) не говорят о том, что подразделение продолжительное время простаивает: E_{ij} % всего имеющегося ресурса (человеческого, технического, информационного и пр.) подразделение затрачивает на достижение определенных групп целей, а оставшийся резерв ресурса подразделение затрачивает на выполнение непосредственных функциональных обязанностей и задач, которые в установленных целях в области качества напрямую не отражены.

Для определения степени зависимости достижимости поставленных целей биофабрики в области качества от эффективности деятельности подразделений-исполнителей рассмотрим процесс достижения целей в нотации IDEF0 (рис. 3).

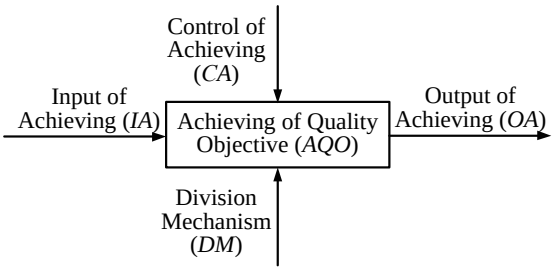


Рис. 3. IDEF0-модель процесса достижения поставленной цели в области качества

В приведенной модели приняты следующие обозначения: *AQO* (Achieving of Quality Objective) – достижение цели в области качества; *IA* (Input of Achieving) – вход в процесс достижения цели; *OA* (Output of

Achieving) – выход из процесса достижения цели; *DM* (Division Mechanism) – ресурс подразделения-исполнителя; *CA* (Control of Achieving) – управление процессом достижения цели.

В табл. 2 приведены входы и выходы процессов достижения рассматриваемых групп целей в области качества.

Соответствие входов IA_i процессов достижения целей / групп целей установленным требованиям является неотъемлемым, обязательным условием начала процесса обеспечения цели / группы целей: без соответствующего требованиям входа процесс просто не начнется.

Таблица 2

Входы и выходы процессов достижения ГЦ1-ГЦ10

Процесс достижения AQO_i	Входы IA_i	Выходы OA_i
ГЦ1 (AQO_1)	Заявки, заключенные договоры, государственные задания на поставку лекарственных средств	Исполненные договоры поставки лекарственных средств
ГЦ2 (AQO_2)	Действующее ПВП	ПВП, соответствующее требованиям GMP
ГЦ3 (AQO_3)	Действующее ПМП	ПМП, соответствующее требованиям GMP
ГЦ4 (AQO_4)	Действующая ИСМК предприятия	ИСМК предприятия, соответствующая требованиям ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ Р ИСО 14001, ГОСТ Р ИСО 22000, сертификаты соответствий
ГЦ5 (AQO_5)	Программа валидации/квалификации помещений, оборудования, инженерных систем и процессов, объекты и предметы валидации / квалификации	Валидированные / квалифицированные объекты, протоколы и отчеты о валидации / квалификации
ГЦ6 (AQO_6)	Заявки, технико-экономическое обоснование приобретения оборудования, требования к автоматизации производства	Закупленное оборудование
ГЦ7 (AQO_7)	План реконструкции производственных помещений, график монтажа и ввода в эксплуатацию закупленного производственного оборудования	Реконструированные производственные помещения, установленное и введенное в эксплуатацию производственное оборудование
ГЦ8 (AQO_8)	Идеи для разработки и внедрения новых препаратов и рецептур; задания Министерства сельского хозяйства РФ и др. заказчиков	Разработанные, внедренные новые препараты и рецептуры напитков; выполненные задания Министерства сельского хозяйства РФ и др. заказчиков
ГЦ9 (AQO_9)	Научные идеи; задания на проведение исследований Министерства сельского хозяйства РФ и др. заказчиков	Оформленные научные идеи; выполненные задания Министерства сельского хозяйства РФ и др. заказчиков
ГЦ10 (AQO_{10})	Заявления о выдаче лицензий, заявления о предоставлении государственной услуги по аккредитации лабораторий, заявления о государственной регистрации лекарственных препаратов	Полученные лицензии, аттестаты аккредитации, зарегистрированные лекарственные препараты

Управляющие воздействия CA_i вносят большой вклад в процесс достижения целей / групп целей в области качества, так как от решений высшего руководства и подразделений-исполнителей процессов менеджмента предприятия зависят:

– выбор или разработка методов и методик проведения мониторинга за результатами работы над достижением целей;

– анализ полученных результатов мониторинга;

– установление направлений улучшений процессов достижения целей;

– распределение обязанностей между исполнителями;

– составление плана действий по проведению анализа улучшений достижения целей;

– внесение предложений и проведение оценки улучшений процессов достижения целей;

– развитие системы улучшений достижения целей;

– мотивация участия персонала,

а также многие другие аспекты производства.

Особый интерес представляет влияние ресурсов DM_j подразделений-исполнителей на обеспечение процессов достижения целей, поэтому в рамках настоящей работы примем абсолютное и безусловное соответствие входов IA_i и управляющих воздействий CA_i требованиям. Тогда соответствие выходов OA_i процессов AQO_i будет зависеть от ресурсов DM_j^i, которые выделяются j-ым подразделением-исполнителем на обеспечение i-ой группы целей в области качества, другими словами, т.е. от эффективности работы подразделений-исполнителей над поставленными целями. В таком понимании рассматриваемые ресурсы DM_j являются потенциалом подразделений.

Используя теорию вероятностей, рассмотрим две группы попарно несовместных событий: AQO, OA, DM – события, соответствующие установленным требованиям; $\overline{AQO}$, $\overline{OA}$, $\overline{DM}$ – события, не соответствующие установленным требованиям.

Тогда вероятность достижения i-ой группы целей в области качества предприятия имеет вид:

$$\begin{aligned} P(OA_i) = {} & P(AQO_i / DM_1^i, AQO_i / DM_2^i, \ldots, AQO_i / DM_j^i) \cdot P(DM_1^i) \cdot \\ & \cdot P(DM_2^i) \cdot \ldots \cdot P(DM_j^i) + P(AQO_i / \overline{DM_1^i}, AQO_i / DM_2^i, \ldots, AQO_i / DM_j^i) \cdot \\ & \cdot P(\overline{DM_1^i}) \cdot P(DM_2^i) \cdot \ldots \cdot P(DM_j^i) + P(AQO_i / DM_1^i, AQO_i / \overline{DM_2^i}, \ldots, \\ & AQO_i / DM_j^i) \cdot P(DM_1^i) \cdot P(\overline{DM_2^i}) \cdot \ldots \cdot P(DM_j^i) + \ldots + P(AQO_i / DM_1^i, \\ & AQO_i / DM_2^i, \ldots, AQO_i / \overline{DM_j^i}) \cdot P(DM_1^i) \cdot P(DM_2^i) \cdot \ldots \cdot P(\overline{DM_j^i}), \end{aligned} \quad (1)$$

где DM_j^i – эффективность подразделений-исполнителей Пj, обеспечивающих ресурсами достижение i-ой группы цели ($j = 1...12$, $i = 1...10$).

С учетом матрицы участия (табл. 1), выражения для вероятностей $P(OA_1)$, $P(OA_2)$, $P(OA_4)$, $P(OA_{10})$ достижения групп ГЦ1, ГЦ2, ГЦ4, ГЦ10 поставленных целей предприятия в области качества примут вид:

$$\begin{aligned} P(OA_k) = {} & P(AQO_k / DM_1^k, AQO_k / DM_2^k, \ldots, AQO_k / DM_{12}^k) \cdot \\ & \cdot P(DM_1^k) \cdot P(DM_2^k) \cdot \ldots \cdot P(DM_{12}^k) + P(AQO_k / \overline{DM_1^k}, AQO_k / DM_2^k, \ldots, \\ & AQO_k / DM_{12}^k) \cdot P(\overline{DM_1^k}) \cdot P(DM_2^k) \cdot \ldots \cdot P(DM_{12}^k) + P(AQO_k / DM_1^k, \\ & AQO_k / \overline{DM_2^k}, \ldots, AQO_k / DM_{12}^k) \cdot P(DM_1^k) \cdot P(\overline{DM_2^k}) \cdot \ldots \cdot P(DM_{12}^k) + \\ & + \ldots + P(AQO_k / DM_1^k, AQO_k / DM_2^k, \ldots, AQO_k / \overline{DM_{12}^k}) \cdot \\ & \cdot P(DM_1^k) \cdot P(DM_2^k) \cdot \ldots \cdot P(\overline{DM_{12}^k}), \end{aligned} \quad (2)$$

где k = 1, 2, 4;

$$P(OA_{10}) = P(AQO_{10} / DM_3^{10}, AQO_{10} / DM_7^{10}, AQO_{10} / DM_8^{10},$$
$$AQO_{10} / DM_{10}^{10}) \cdot P(DM_3^{10}) \cdot P(DM_7^{10}) \cdot P(DM_8^{10}) \cdot P(DM_{10}^{10}) +$$
$$+ P(AQO_{10} / \overline{DM_3^{10}}, AQO_{10} / DM_7^{10}, AQO_{10} / DM_8^{10}, AQO_{10} / DM_{10}^{10}) \cdot$$
$$\cdot P(\overline{DM_3^{10}}) \cdot P(DM_7^{10}) \cdot P(DM_8^{10}) \cdot P(DM_{10}^{10}) + P(AQO_{10} / DM_3^{10},$$
$$AQO_{10} / \overline{DM_7^{10}}, AQO_{10} / DM_8^{10}, AQO_{10} / DM_{10}^{10}) \cdot P(DM_3^{10}) \cdot \quad (3)$$
$$\cdot P(\overline{DM_7^{10}}) \cdot P(DM_8^{10}) \cdot P(DM_{10}^{10}) + P(AQO_{10} / DM_3^{10}, AQO_{10} / DM_7^{10},$$
$$AQO_{10} / \overline{DM_8^{10}}, AQO_{10} / DM_{10}^{10}) \cdot P(DM_3^{10}) \cdot P(DM_7^{10}) \cdot P(\overline{DM_8^{10}}) \cdot$$
$$\cdot P(DM_{10}^{10}) + P(AQO_{10} / DM_3^{10}, AQO_{10} / DM_7^{10}, AQO_{10} / DM_8^{10},$$
$$AQO_{10} / \overline{DM_{10}^{10}}) \cdot P(DM_3^{10}) \cdot P(DM_7^{10}) \cdot P(DM_8^{10}) \cdot P(\overline{DM_{10}^{10}}).$$

Выражения для вероятностей: $P(OA_3)$, $P(OA_5)$, $P(OA_6)$, $P(OA_7)$, $P(OA_8)$, $P(OA_9)$ в настоящей работе не приводятся ввиду их значительного размера.

Тогда математическая модель обеспечения достижимости поставленных групп целей в области качества ФКП «Курская биофабрика» имеет вид (4)

$$\begin{cases} P(OA_1) = f[P(AQO_1 / DM_{1...12}^1), P(DM_{1...12}^1), P(\overline{DM_{1...12}^1})]; \\ P(OA_2) = f[P(AQO_2 / DM_{1...12}^2), P(DM_{1...12}^2), P(\overline{DM_{1...12}^2})]; \\ P(OA_3) = f[P(AQO_3 / DM_{j_3}^3), P(DM_{j_3}^3), P(\overline{DM_{j_3}^3})]; \\ P(OA_4) = f[P(AQO_4 / DM_{1...12}^4), P(DM_{1...12}^4), P(\overline{DM_{1...12}^4})]; \\ P(OA_5) = f[P(AQO_5 / DM_{j_5}^5), P(DM_{j_5}^5), P(\overline{DM_{j_5}^5})]; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P(OA_6) = f[P(AQO_6 / DM_{j_6}^6), P(DM_{j_6}^6), P(\overline{DM_{j_6}^6})]; \\ P(OA_7) = f[P(AQO_7 / DM_{j_7}^7), P(DM_{j_7}^7), P(\overline{DM_{j_7}^7})]; \\ P(OA_8) = f[P(AQO_8 / DM_{j_8}^8), P(DM_{j_8}^8), P(\overline{DM_{j_8}^8})]; \\ P(OA_9) = f[P(AQO_9 / DM_{j_9}^9), P(DM_{j_9}^9), P(\overline{DM_{j_9}^9})]; \\ P(OA_{10}) = f[P(AQO_{10} / DM_{j_{10}}^{10}), P(DM_{j_{10}}^{10}), P(\overline{DM_{j_{10}}^{10}})], \end{cases} \quad (4)$$

где $j_3 = 1...5, 7...12$, $j_5 = 2, 3, 5, 7...9$, $j_6 = 1...5, 7, 8, 10, 11$, $j_7 = 1...4, 7, 8, 11$, $j_8 = 7, 8, 10...12$, $j_9 = 6...8, 10...12$, $j_{10} = 3, 7, 8, 10$.

В табл. 3 приведены результаты численного моделирования вероятностей достижения поставленных групп целей при различных значениях эффективности (потенциала) обеспечивающих подразделений: при фактических значениях E_{ij} и при максимально возможных значениях $E\max_{ij}$.

Таблица 3

Результаты численного моделирования вероятностей достижения групп целей ФКП «Курская биофабрика»

Вероятность достижения $P(OA_i)$, %	При фактическом потенциале E_{ij}, %	При максимальном потенциале $E\max_{ij}$, %	Вероятность достижения $P(OA_i)$, %	При фактическом потенциале E_{ij}, %	При максимальном потенциале $E\max_{ij}$, %
$P(OA_1)$	6,12	97,42	$P(OA_6)$	29,35	97,91
$P(OA_2)$	6,12	97,42	$P(OA_7)$	48,12	98,21
$P(OA_3)$	12,22	97,59	$P(OA_8)$	77,46	98,47
$P(OA_4)$	6,12	97,42	$P(OA_9)$	51,31	98,34
$P(OA_5)$	51,35	98,34	$P(OA_{10})$	91,47	98,59

Для расчета достижимости групп целей в области качества приняты следующие значения вероятностей:

– вероятности формирования и поступления соответствующих входов процессов и управляющих воздействий на процессы достижения целей составляют $P(IA_i) = P(CA_i) = 0{,}99$, т. е. безусловное соответствие требованиям;

– при максимальном потенциале $E\max_{ij}$ подразделений вероятность формирования и поступления соответствующего ресурса от подразделения-исполнителя $P(DM_j^i) = 0{,}99$, т.е. полное соответствие требованиям;

– при фактическом потенциале подразделений значения E_{ij} приняты согласно табл. 1;

– значения вероятностей, включающих величины второго порядка малости, т. е. вероятность достижения поставленной цели при поступлении несоответствующего ресурса $P(AQO_i / \overline{DM_{1\ldots j}^i}) = 0{,}9$.

Как видно из табл. 3, чем большее количество подразделений задействовано в достижении цели (группы целей), тем меньше вероятность ее достижения. Это обусловлено ростом сопротивления организации в связи со снижением согласованности персонала. Так, например, вероятность достижения ГЦ1 (при участии всех 12-ти подразделений-исполнителей) намного меньше вероятности достижения ГЦ10 (при участии в их выполнении лишь 4-х подразделений-исполнителей).

Полученные результаты моделирования для большей наглядности приведены на рис. 4, из которого видно, что фактический потенциал подразделений-исполнителей групп целей не может обеспечить достижение поставленных целей: лишь ГЦ10 может быть достигнута на 91,47 %. Привлечение дополнительного потенциала подразделений позволит достичь каждую из поставленных групп целей не менее чем на 97 %.

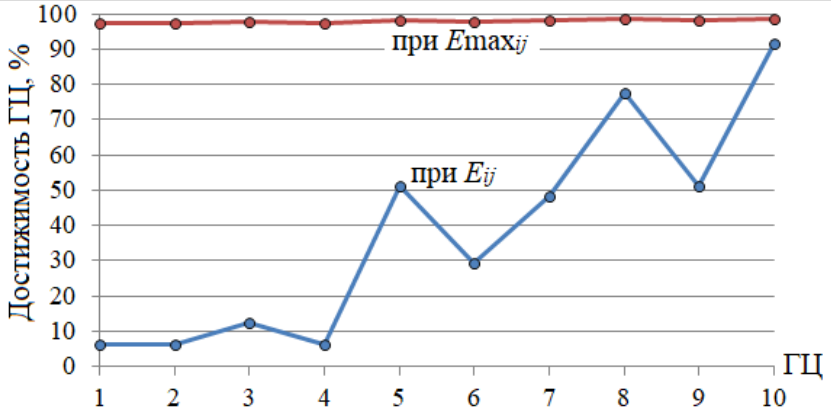


Рис. 4. Достижимость ГЦ предприятия при фактическом E_{ij} и максимальном E_{maxij} потенциалах подразделений-исполнителей

Основной проблемой при планировании достижения цели (группы целей) в области качества является поиск путей привлечения дополнительного потенциала обеспечивающих выполнение цели подразделений.

В целом, в качестве путей повышения эффективности работы подразделений-исполнителей над достижением группы целей могут выступать:

– оптимизация числа подразделений-исполнителей, задействованных в работах по достижению поставленной цели в области качества;

– распределение времени, затрачиваемого каждым подразделением-участником для выполнения каждой цели (оптимизация ресурсов времени подразделений);

– введение в организационную структуру предприятия новых подразделений, отвечающих за конкретные задачи (например, отдел валидации, отдел лицензирования / аккредитации и пр.);

– декомпозиция цели (группы целей) на более простые в плане достижения, либо объединение целей для обеспечения их совместного достижения;

– нормирование требуемых значений достижимости цели, определение необходимого уровня достижимости (например: задание интервала достижимости: 95-100 %; задание уровня минимального достижения цели 95 % и пр.);

– совершенствование методов мониторинга и измерений достижимости целей (например, внедрение ступенчатого мониторинга и периодической оценки достижимости с последующей коррекцией процессов достижения целевых значений);

– обучение персонала, привлечение обученного персонала;

– повышение мотивации персонала.

Таким образом, разработанный подход к обоснованному целеполаганию целей в области качества промышленного предприятия позволяет не только управлять достижимостью поставленных целей предприятия в области качества посредством управления эффективностью деятельности задействованных в их достижении подразделений, но также позволяет

прогнозировать вероятность выполнения поставленных целей. Предложенная математическая модель обеспечения достижимости поставленных групп целей в области качества ФКП «Курская биофабрика» служит как для управления, так и для прогнозирования вероятности достижения целей предприятия в области качества. Сам подход может быть применен для любого промышленного предприятия, осуществляющего целенаправленную деятельность в области качества.

Список литературы

1. Аникеева О.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Определение показателей взаимодействующих подсистем промышленных предприятий для достижения целей в области качества // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2020. № 12. С. 136-144. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-136-144.

2. Ивахненко А.Г., Аникеева О.В. Взаимодействие подсистем предприятий при целевом управлении качеством продукции // Вестник Брянского государственного технического университета, 2020. № 11 (96). С. 44-51. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-11-44-51.

3. Аникеева О.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Моделирование влияния значений параметров взаимодействия потенциала и организационного сопротивления на достижимость целей в области качества при ступенчатом виде управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2020. № 10. С. 3-9.

4. Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Сторублев М.Л. Структурная модель формирования качества продукции в пространстве состояний процессов промышленного предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2019. Т.21, № 4. С. 76-81.

5. Аникеева О.В. Подход к описанию комплексного взаимодействия социально-экономических, организационных и технических подсистем при управлении качеством в пространстве состояний процессов // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции. Курск: ЮЗГУ, 2019. В 2-х т. Т.1 С. 67-72.

6. Аникеева О.В., Жиляев А.А., Ивахненко А.Г., Исламова О.В., Козловский В.Н. Использование функциональной модели IDEF0 для расчёта рисков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2022. № 5 (355). С. 89-98. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-355-5-89-98.

7. Федеральное казенное предприятие КУРСКАЯ БИОФАБРИКА ФИРМА "БИОК": официальный сайт [Электронный ресурс] URL: http://www.biok.ru (дата обращения: 20.01.2025).

8. Анцев В.Ю., Иноземцев А.Н. Всеобщее управление качеством: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 220501 Управление качеством. Тула, 2005. 243 с.

9. Анцев В.Ю., Витчук Н.А. Управление производственным процессом на основе построения структурно-функциональных моделей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 8. Ч. 2. С. 139-146.

10. Porter M.E. Competitive Advantage. New York: Free Press, 1985.

Аникеева Олеся Владимировна, канд. техн. наук, доцент, специалист по качеству, olesya-anikeeva@yandex.ru, Россия, Курск, ФКП «Курская биофабрика»,

Ивахненко Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, ivakhnenko2002@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Шеметюк Сергей Александрович, канд. биол. наук, доцент, заместитель директора по производству, ssa@biok.ru, Россия, Курск, ФКП «Курская биофабрика»,

Козлов Павел Александрович, руководитель службы качества, kozlov394@mail.ru, Россия, Курск, ФКП «Курская биофабрика»

SOUND GOAL SETTING WHEN PLANNING THE PRODUCTION ACTIVITIES OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

O.V. Anikeeva, A.G. Ivakhnenko, S.A. Shemetyuk, P.A. Kozlov

An approach to sound goal-setting in the field of industrial enterprise quality has been developed, which makes it possible to manage the achievability of set quality goals by managing the effectiveness of the activities of the organization's departments involved in achieving them. The approach was tested using the example of a pharmaceutical company. A mathematical model has been developed for the enterprise in question to ensure the achievability of the set groups of quality objectives.

Key words: quality goals, goal setting, achievability, work efficiency, probability.

Anikeeva Olesya Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, quality management specialist, olesya-anikeeva@yandex.ru, Russia, Kursk, Kursk Biofactory,

Ivakhnenko Alexander Gennadievich, doctor of technical sciences, professor, ivakhnenko2002@mail.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Shemetyuk Sergey Aleksandrovich, candidate of biological sciences, docent, deputy director for production, ssa@biok.ru, Russia, Kursk, Kursk Biofactory,

Kozlov Pavel Aleksandrovich, head of quality service, kozlov394@mail.ru, Russia, Kursk, Kursk Biofactory

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.391
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-243-244

МОДЕЛЬ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ С ОГРАНИЧЕННОЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬЮ

А.М. Чуднов, Л.П. Сапунова, В.Р. Бикбулатов

Разработана аналитическая модель канала передачи данных (КПД), ориентированная на решение задач анализа и оптимизации параметров физического и канального уровней в условиях воздействия преднамеренных помех, структура которых может подбираться с позиции нарушения (ухудшения) работы системы. В рамках модели определяется оптимальная с позиции минимизации скорости передачи информации в канале стратегия источника помехи (ИП) с ограниченной средней мощностью. Получены соотношения, позволяющие определять гарантированную скорость передачи информации с заданной достоверностью по КПД, функционирующему в условиях воздействия преднамеренных помех при ограничении на суммарную мощность источников. Представлена методика, приведены примеры расчета и показаны графики зависимостей гарантированной скорости передачи информации в КПД. Результаты могут быть использованы как для нахождения наихудшей стратегии ИП, так и для оптимизации параметров физического и канального уровней КПД.

Ключевые слова: канал передачи данных, физический и канальный уровни, преднамеренная помеха с ограниченной средней мощностью, гарантированная скорость передачи информации, минимаксная постановка задачи, теоретико-игровая задача.

Введение. Настоящая работа направлена на исследование методов анализа и оптимизации параметров и режима обработки сигналов в канале передачи данных (КПД), функционирующем в условиях воздействия преднамеренных помех, структура которых может подбираться с позиции нарушения (ухудшения) работы системы [1–5]. Вопросам оценки и анализа гарантированных показателей систем передачи информации, в частности функционирующих в условиях преднамеренных помех, в силу актуальности в литературе уделяется значительное внимание (см., например, работы [1, 2, 6–16] и библиографию в них). На основе теоретических исследований разработаны, внедрены и широко используются в различных сферах линии связи с псевдослучайными сигналами (ПСС) [1, 3, 6–8]. Вместе с тем

в недостаточной степени изучены вопросы анализа и оптимизации параметров КПД в условиях оптимизированного воздействия противодействующей системы, особенностью которого является то, что из возможных для него вариантов постановки помехи, ограниченных техническим, энергетическим, информационным, организационным, умственным, … ресурсом, источник помехи (ИП) контрсистемы выберет наихудший для КПД вариант, т. е. такой, который приведет к минимальной эффективности функционирования канала связи. В рамках разрабатываемой модели определяется оптимальная с позиции минимизации скорости передачи информации в канале стратегия ИП, что позволяет решать на основе ее использования задачи анализа и оптимизации параметров физического и канального уровней КПД, функционирующего в условиях воздействия преднамеренных помех.

Таким образом, решаемая задача построения модели КПД включает:

– формирование достаточно общей математической конструкции $\mathbb{U}$, представляющей класс собственно КПД на физическом и канальном уровнях;

– корректное формализованное описание класса $\mathbb{V}(\delta)$ допустимых вариантов (стратегий) постановки контрсистемой преднамеренных помех, параметризованного показателем энергетического ресурса δ);

– методику оптимизации стратегии ИП $V \in \mathbb{V}(\delta)$, направленной на минимизацию заданного показателя $R(U,V)$ эффективности функционирования КПД $U \in \mathcal{U}$, с оценкой зависимости этого показателя от параметров КПД и ИП, т. е. решения задачи

$$R(U,V) \to \min_{V \in \mathbb{V}(\delta)} \quad (1)$$

с получением результатов:

$$V^*(\delta) = \operatorname*{argmin}_{V \in \mathbb{V}(\delta)} R(U,V)\,,\ R^*(\delta,U) = \min_{V \in \mathbb{V}(\delta)} R(U,V) = R(U,V^*(\delta)), \quad (2)$$

где величина $V^*(\delta)$ представляет оптимальную (оптимизированную) стратегию ИП в классе $\mathbb{V}(\delta)$, а $R^*(U)$ – гарантированное для КПД U значение показателя эффективности.

Важно отметить, что для корректности модели и анализа на ее основе показателей КПД множество допустимых стратегий $\mathbb{V}(\delta)$ должно быть достаточно полным, поскольку неучет какой-либо возможной (эффективной) стратегии контрсистемы приведет к бесполезному по существу результату. Как и в [2, 6, 9–14, 18, 19], в работе класс $\mathbb{V}(\delta)$ допустимых стратегий ИП определен ограничением на величину δ средней суммарной мощности помех, воздействующих на приемник КПД. В [9, 10] отмечено, что такой тип ограничений представляет наибольший практический интерес с учетом следующих обстоятельств:

– существующие и проектируемые комплексы радиоэлектронного противодействия способны формировать помехи с весьма большими значениями пикфактора, и степень их воздействия на СПИ в основном определяется средним значением мощности источника;

– источники помех (ИП), как правило, ориентированы на подавление группы радиолиний, что позволяет перераспределять энергию между этими линиями с обеспечением наихудшего воздействия на подавляемые линии в рамках ограничений на общую среднюю мощность источника [4, 17];

– класс помех с ограничениями на среднюю мощность является наиболее широким: оценки гарантированной помехоустойчивости для этого случая представляют собой соответствующие оценки и для других классов помех.

В свою очередь модель собственно КПД (т. е. конструкция $\mathbb{U}$) должна обеспечивать представление вариантов технических решений, принимаемых на физическом и канальном уровнях, эффективных для его защиты от преднамеренных помех.

Оптимизация стратегии ИП в классе $\mathbb{V}(\delta)$ (решение задачи (1)) осуществляется в соответствии с методикой, разработанной в [11], которая здесь распространена на модели канального уровня.

Далее в статье формализуются конструкции, участвующие в задаче (1), (2), строится методика определения искомых зависимостей $V^*(\cdot), R^*(\cdot)$, приводятся примеры и интерпретации.

Основные результаты. Формализация задачи (1) проводится на основе конкретизации конструкций $\mathcal{U}$, $\mathcal{V}$, R, представленных ниже моделями СПИ и ИП. Соотношения для показателей эффективности КПД при оптимизированной стратегии помехи далее строятся в следующей последовательности. Сначала формируются соответствующие оценки показателей для известной детерминированной реализации v помехи, на основе которых вырабатываются соотношения для преднамеренной помехи V с распределением $F_V(v)$ и затем оптимальным распределением F_V^* в допустимом множестве, соответствующем классу стратегий ИП $\mathbb{V}(\delta)$.

Формирование, передача и обработка данных в КПД

Процессы формирования, обработки и передачи данных на физическом и канальном уровнях КПД иллюстрируются функциональной схемой, представленной на рис. 1.

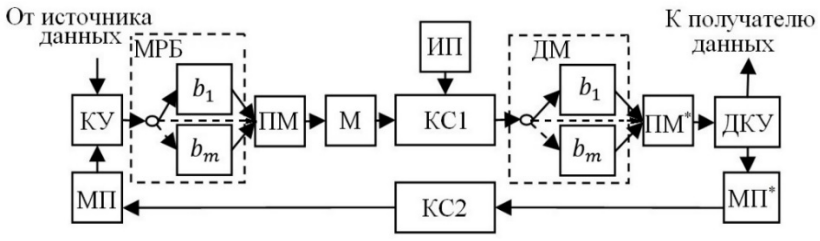


Рис. 1. Модель канала передачи данных

Поступающие от источника данных информационные символы $a_i \in \{0, 1\}$ подаются в кодирующее устройство (КУ), которое формирует канальные блоки $(a_1, \ldots, a_n)$, представляющие собой кодовые слова (n, k)-кода (n – длина блока, k – число содержащихся в нем информационных

элементов), и подает их в модуль рандомизации базы (МРБ). МРБ преобразует символы кодовых слов в псевдослучайную {–1,1}-последовательность, длина b которой (база ПСС) выбирается в общем случае (при $m > 1$) псевдослучайным образом в соответствии с распределением $P_b(i), \sum_{i=1}^{m} P_b(i) = 1.$, после чего передает ее в перемежающий модуль (ПМ). В перемежающем модуле из определенного числа L канальных блоков формируется макроблок, состоящий из nL символов, которые перемешиваются по псевдослучайному закону, известному как на передающем, так и принимающем концах СПИ, и затем подаются в модулятор (М), где осуществляется их фазовая модуляция. Сформированные таким образом на передающем конце сигналы $s(\tau)$ поступают в канал связи (КС1), в котором они смешиваются с преднамеренной помехой $v(\tau)$, генерируемой источником противодействующей системы и совокупностью случайных помех (шумов) $\xi(\tau)$. При этом принимаемый из КС1 сигнал имеет вид

$$u(\tau) = s(\tau) + v(\tau) + \xi(\tau).$$

Поступающие из КС1 сигналы $u_1(\tau), u_2(\tau), \ldots$ подаются на вход демодулятора (ДМ), который обрабатывает их в соответствии с величиной базы и подает зарегистрированные данные в перемежающий модуль (ПМ*), осуществляющий обратное перемежение (восстановление исходного порядка следования) символов макроблока и выдачу сформированных канальных блоков $(c_1, \ldots, c_n)$ в декодирующее устройство (ДКУ).

Декодирующее устройство работает в режиме исправления ошибок кратности менее или равной r, причем $r \leq t$, где t – максимальная кратность гарантированно исправляемых заданным кодом ошибок, определяемая через минимальное расстояние кода $d = 2t + 1$ [12]. Так что не исправленные кодом ошибки либо переспрашиваются по обратному каналу связи (КС2) модулем переспроса (МП*) и повторяются на передаче модулем повторения (МП), либо декодируются неправильно и выдаются получателю с ошибкой.

Показатели эффективности КПД при фиксированной мощности помехи. Для описания показателей, характеризующих воздействие помехи на **физический уровень КПД**, введем дополнительно обозначения: E_s, E_v – соответственно энергия реализации сигнала и преднамеренной помехи на длительности сигнала, E_ξ – спектральная плотность мощности шума; $w_v = \frac{E_v}{E_s}, w_\xi = \frac{w_\xi}{2E_s}, w = w_v + bw_\xi.$

Вероятность ошибочной регистрации бита данных p_b при фиксированной мощности помехи w_v оценивается функцией $p_e(w_v) = \varphi\left(\frac{\mathrm{w}}{\mathrm{b}}\right)$, определяемой способом формирования и приема сигналов. Для примера будем рассматривать «типовой» случай построения алгоритмов модуляции/демодуляции, при котором модулятором формируются амплитудно-фазоманипулированные псевдослучайные сигналы, а на приеме для их различения используется решающее правило Котельникова [11, 19]. При фиксированной мощности помехи d_v вероятность ошибки составит величину

$$p_e(w) = 1 - \mathcal{F}_b(\sqrt{b/w}), \quad (3)$$

где $\mathcal{F}_h(x)$ – функция распределения вероятностей (ФРВ) (введена в [15]) численно равная отношению площади сферического b-мерного сегмента с высотой x, отсеаемого от единичной сферы, к площади всей сферы. Формулы для вычисления $\mathcal{F}_b(x)$ приведены в [11, 19], при этом установлена сходимость величины $\lim\limits_{b\to\infty} \mathcal{F}_b\left(x/\sqrt{w}\right) = \mathcal{F}(x)$, где $\mathcal{F}(x)$ – интеграл вероятностей Гаусса, что позволяет уже при $b \geq 10$ использовать аппроксимацию

$$p_e(d) \approx 1 - \mathcal{F}\left(\sqrt{b/w}\right),$$

где $w = w_v + bw_\xi$.

Для параметров **канального уровня** введены обозначения:

$P_x = P_x(n, r, p_e)$ – вероятность того, что в принятом канальном блоке содержится более r ошибок;

$P_{e/x} = P_{e/x}(n, k, r)$ – условная вероятность необнаруженной ошибки в принятом канальном блоке (при условии, что в нем содержится более r ошибок);

$P_e = P_e(n, k, r, p_e)$ – вероятность необнаруженной ошибки в принятом канальном блоке;

$P_r = P_r(n, k, r, p_e)$ – вероятность переспроса поступившего канального блока;

$P_\varepsilon = P_\varepsilon(n, k, r, p_e)$ – вероятность выдачи на сетевой уровень информационного блока с необнаруженной ошибкой;

$p_\varepsilon = p_\varepsilon(n, k, r, p_e)$ – приведенная величина вероятности ошибки (приходящаяся на информационный бит передаваемого в КПД сообщения).

Дополнительные к перечисленным вероятности обозначаются символами Q, q с аналогичным индексами и аргументами, например, $Q_x = 1 - P_x, q_\varepsilon = 1 - p_\varepsilon$. Оценки значений указанных величин осуществляются с использованием соотношений:

$P_x(n, r, p_e) = \sum_{i>r}\binom{n}{i} p_e^i\,(1 - p_e)^{n-i}$ (формула Бернулли с учетом перемежения символов макроблока);

$$P_{e/x} = \frac{2^k - 1}{2^n/S_n(r) - 1},$$

где $S_n(r) = \sum_{i=0}^{r}\binom{n}{i}$ – объем шара в n-мерном пространстве Хэмминга над $GF(2)$ (соотношение для $P_{e/x}$ из [12, 19]);

$$P_e = P_x P_{e/x} = P_x \frac{2^k - 1}{2^n/S_n(r) - 1};\ Q_e = Q_x + P_x Q_{e/x};$$

$$P_r = P_x Q_e;\ \ P_\varepsilon = \frac{P_e}{Q_r} = \frac{P_x P_{e/x}}{1 - P_x Q_e};$$

$$p_\varepsilon = 1 - (1 - P_\varepsilon)^{\frac{1}{k}} \approx P_\varepsilon/k \quad (4)$$

Относительная скорость передачи информации в КПД определяется соотношением

$$R(n, k, r, p_e) = \frac{k}{bn} Q_r(n, k, r, p_e), \quad (5)$$

Величины (4), (5) выступают в качестве основных показателей, характеризующих эффективность функционирования КПД.

Показатели эффективности КПД при оптимизированной помехе

Рассматривается **модель источника помех** с «сильной инерционностью» контура управления [18, 19], в соответствии с которой невозможна постановка так называемой «помехи вслед сигналу», т. е. помехи, воздействующей на символ канального блока a_i с использованием информации о ранее принятой части этого же символа. Вместе с тем источнику помех известны все параметры, характеризующие СПИ.

В (3) величину w будем относить либо к суммарной мощности случайной и преднамеренной помехи, что приводит к некоторому завышению оценки p_e, либо к мощности лишь преднамеренной помехи, в этом случае оценка p_e несколько занижается за счет исключения из рассмотрения случайной помехи.

С учетом перемежения символов с позиции воздействия на канальный блок стратегия помехи полностью определяется одномерной ФРВ F_W мощности помехи, для которой условие $V \in \mathbb{V}(\delta)$ можно записать в виде

$$F_W \in \mathbb{F}(\delta) = \{F | \mathbf{E}[W] = \delta\} \quad (6)$$

Для канала с рандомизированной мощностью помехи средние значения P_z^-, p_z^-, Q_z^- всех перечисленных выше параметров P_z, p_z, Q_z определяются путем усреднения исходных по распределению F_W. В формулах факт усреднения отмечается окружением аргументов квадратными скобками, т. е. под записью $P_z^-[, \dots, F_W, \dots]$ понимается выражение $P_z^-[, \dots, F_W, \dots] = \mathbf{E}[P_z(, \dots, W, \dots)]$. Принимая во внимание соотношение (3), выражения (4), (5) удобно представить в виде

$$p_\varepsilon^-[n, k, r, W] = \mathbf{E}[1 - (1 - P_\varepsilon)^{\frac{1}{k}}],$$
$$R^-[n, k, r, W] = \frac{k}{bn}\mathbf{E}[Q_r(n, k, r, p_e)\mathbf{I}(p_\varepsilon^- \le p^*)], \quad (7)$$

где: $\mathbf{I}(\cdot)$ – индикатор истинности условия $(\cdot)$, принимающий значения в $\{0,1\}$, p^* – максимально допустимая для КПД вероятность ошибки бита сообщения.

Таким образом, оценка показателя эффективности КПД в соответствии с (1) сведена к задаче минимизации функционала (7) функцией F_W в классе ФРВ $\mathbb{F}(\delta)$ (6):

$$R^-[n, k, r, W] \to \min_{F_W \in \mathbb{F}(\delta)}, \quad (8)$$

решение которой определяет наряду с гарантированным значением показателя скорости передачи информации в КПД

$$R^*[n, k, r, W] = R^*(n, k, r, \delta) = \min_{F_W \in \mathbb{F}(\delta)} R^-[n, k, r, W],$$

оптимальную стратегию ИП, задаваемую ФРВ

$$F_W^* = \operatorname*{argmin}_{F_W \in \mathbb{F}(\delta)} R^-[n, k, r, W].$$

Оптимизация стратегии ИП (решение задачи (8)) осуществляется в соответствии с методикой, разработанной в [11] на основе метода моментов Маркова (детально описана в [18], с. 137–139 и в [19]). Методика основана на теоремах Каратеодори [20] (о крайних точках компактов в евклидовых пространствах) и Рисса (о представимости векторов выпуклых

множеств) и предполагает построение выпуклой оболочки функции $R(n,k,r,p_e(w))$, определенной выражениями (3), (5), по аргументу w. При этом гарантированное значение скорости передачи информации определяется равенством

$R^*(n,k,r,\delta) = R^\vee(n,k,r,\delta)$, Другими словами, для нахождения зависимости $R^*(\dots,\delta)$ достаточно построить выпуклую оболочку функции $R(\dots,p_e(w))$ по аргументу w и заменить w на δ.

Пример получения зависимости $R^*(n,k,r,\delta/b)$ для кода с $n = 127, k = 98$ для режимов декодирования, задаваемых значениями $r = 2-4$ иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 2, где сплошными черными линиями представлены зависимости $R_0(w/b) = nbR\big(n,k,r,p_e(w)\big)/k$, серыми – отрезки, образующие выпуклые оболочки $R_0^\vee\left(\frac{\delta}{b}\right) = nbR^\vee\big(n,k,r,p_e(w)\big)/k$, пунктирная линия соответствует зависимости $R_0(w/b)$ в области значений w/b, в которой не выполняются требования по достоверности передачи информации в КПД ($p_e^* = 10^{-6}$). Оптимальная стратегия ИП реализует выпуклую оболочку кривой $R(\dots,p_e(w))$ действуя с ФРВ $F_W^* = (1-p')\mathbf{I}(w) + p'\mathbf{I}(w-w')$, где

$$w' = \underset{w\in[\delta,\infty]}{\operatorname{argmax}} \left[1 - \frac{w}{\delta}R\left(n,k,r,p_e\left(\frac{w}{\delta}\right)\right)\right], p' = \frac{w'}{\delta},$$

т. е. в импульсном режиме с мощностью w', выделяемой на символ кода с вероятностью p'.

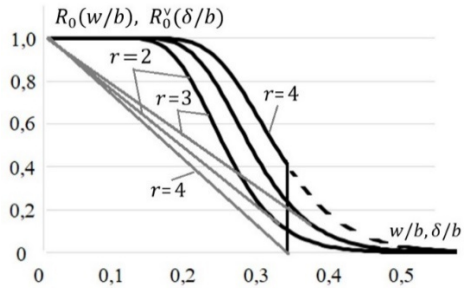


Рис. 2. Зависимость показателей $\mathbf{R_0(w/b)}$, $\mathbf{R_0^\vee(\delta/b)}$ от параметра r

Заключение. Разработанная модель позволяет оценивать гарантированные значения показателей эффективности функционирования КПД в классе помех с ограничением на мощность источника (совокупность источников) преднамеренных помех. При этом результаты распространяются на широкий класс КПД, включая каналы с кодированием, обратной связью, различными режимами декодирования, а также использующими на физическом уровне различные алгоритмы формирования и приема псевдослучайных сигналов.

Модель позволяет решать задачи синтеза алгоритмов обмена данными и оптимизации параметров физического и канального уровней КПД, функционирующих в условиях преднамеренного радиоэлектронного подавления.

Список литературы

1. Pirayesh H, Zeng H. Jamming attacks and anti-jamming strategies in wireless networks: A comprehensive survey // IEEE Communications. Surveys Tutorial, 2022.

2. Cahn C. Worst interference for coherent binary channel. // IEEE Trans. Inform. Theory. – 1971. – Vol. 19. IT-17, – P. 209–210.

3. Li M., Koutsopoulos I., POOVENDRAN, R. Optimal jamming attacks and network defense policies in wireless sensor networks. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (InfoCom) (2007), pp. 1307–1315.

4. Poisel R. A. Modern Communication Jamming Principles and Techniques, 2-nd edition. Boston-London: Artech House. – 2011.

5. Mpitziopoulos A., Gavalas D., Konstantopoulos C., Pantziou G. E. A survey on jamming attacks and countermeasures in wsns // IEEE Communications Surveys and Tutorials, – 2009. – Vol. 11, no. 4. – P. 42–56.

6. Чуднов А.М. Помехозащищенность системы передачи информации с псевдослучайным переключением частот в условиях наихудших помех // Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1984, т. 27, №9. С. 3–8.

7. Kullstam P. A. Spread Spectrum Performance Analysis in Arbitrary Interference // IEEE Transactions on Communications. 1977. Vol. 25. Iss. 8. PP. 848–853. https://doi.org/10.1109/TCOM.1977.1093906

8. Nguyen B. V., Nguyen M. T., Jung H., Kim K. Designing Anti-Jamming Receivers for NR-DCSK Systems Utilizing ICA, WPD, and VMD Methods // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2019. Vol. 66, no. 9, pp. 1522–1526. DOI: 10.1109/TCSII.2019.2891254.

9. Чуднов А.М., Кичко Я.В., Сапунова Л.П. Оптимизация гарантированной скорости передачи информации псевдослучайным сигналами с рандомизированной базой в условиях преднамеренных помех Радиотехника и электроника, 2023, том 68, № 3. С. 263–270. DOI: 10.31857/S0033849423030051.

10. Жодзишский Ю.И. Максимальная гарантированная помехоустойчивость приема сигналов при ограничении средней мощности мешающих воздействий // Радиотехника. 1986. № 10. С. 56–57.

11. Чуднов А.М. Теоретико-игровые задачи синтеза алгоритмов формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. – 1991. Том 27. № 3. С. 57–65.

12. Чуднов А. М., Кирик Д. И., Ермакова Е.М. Оптимизация параметров кода и режима обработки сигналов в условиях преднамеренных помех // Труды учебных заведений связи

13. Чуднов А.М., Сапунова Л.П. Об адаптивных алгоритмах ППРЧ в условиях случайных и преднамеренных помех // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления. 2015. С. 73-78

14. Вейцель В.А., Жодзишский М.И., Жодзишский Ю.И. Гарантированная помехоустойчивость приема сигналов // РЭ. 1987. Т. 32. № 2. С. 316–321.

15. Чуднов А.М. О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов // Пробл. передачи информ. 1986. Т. 22. № 4. С. 49–54. https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=ppi&paperid=958&option_lang=rus

16. Chen Y., Yuan W., Xu T. Coding Split and Adjustment to Defend OFDM-IM Against Jamming Attacks // IEEE Communications Letters. – 2023. – Vol. 27, № 2. – P, 457–461. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3224381.

17. Макаренко С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020.

18. Комментарий к статье Н.Н. Плотникова, А.В. Войнова и А.Н. Путилина «Выбор алгоритма адаптации по рабочей частоте в однополосной радиолинии тропосферной связи» // Вопросы оборонной техники. Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. 2024. Вып. 11–12. С. 20–30. DOI: 10.53816/23061456_2024_11–12_20.

19. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем. – СПб. : ВАС, 2021.

20. Крейн М. Г., Нудельман А. А. Проблема моментов Маркова и экстремальные задачи. М.: Наука, 1973.

Чуднов Александр Михайлович, д-р тех. наук, профессор, chudnow@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи,

Сапунова Лидия Петровна, начальник учебного командного пункта, lidiya.karmanec@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи,

Бикбулатов Владислав Родионович, адъюнкт, vlaad.bik@icloud.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи

MODEL OF A DATA TRANSMISSION CHANNEL WITH FEEDBACK UNDER CONDITIONS OF INFLUENCE OF INTENTIONAL INTERFERENCE WITH LIMITED AVERAGE POWER

A.M. Chudnov, L.P. Sapunova, V.R. Bikbulatov

An analytical model of the data transmission channel (KPI) has been developed, focused on solving the problems of analyzing and optimizing the parameters of the physical and channel levels under the influence of intentional interference, the structure of which can be selected from the perspective of disruption (deterioration) of the system. Within the framework of the model, the optimal interference source (IP) strategy with limited average power is determined from the point of view of minimizing the information transmission rate in the channel. Ratios have been obtained that make it possible to determine the guaranteed information transmission rate with a given reliability based on efficiency, operating under conditions of exposure to intentional interference with a limitation on the total power of sources. The methodology is presented, calculation examples are given, and graphs of the dependence of the guaranteed information transfer rate on efficiency are shown. The results can be used both to find the worst-case IP strategy and to optimize the parameters of the physical and channel efficiency levels.

Key words: data transmission channel, physical and channel layers, intentional interference with limited average power, guaranteed information transfer rate, minimax problem statement, game-theoretic problem.

Chudnov Alexander Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, chudnow@yandex.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications,

Sapunova Lidiya Petrovna, head of the training command post, lidiya.karmanec@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications,

Bikbulatov Vladislav Rodionovich, adjunct, vlaad.bik@icloud.com, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications

УДК 629.7.01
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-252-253

АНАЛИЗ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ К АЭРОДИНАМИЧЕСКОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

В.В. Ветров, М.А. Губарев, Е.М. Костяной, А.М. Степанов, А.А. Ширяев

В статье выполнен обзор используемых подходов к аэродинамическому проектированию. Отмечено, что на практике имеются предпосылки либо к нерациональному использованию ресурсов, либо к ухудшению качества результатов проектирования вследствие применения на всех этапах разработки одного и того же инструмента. Предложено сравнить подходы, в которых используются одни и те же инструменты на разных стадиях проектирования, с подходами, в которых стоимость и точность инструмента меняются от этапа к этапу. Задача формализована в статистической постановке в терминах точности и стоимости инструмента, скорости сходимости процесса проектирования, максимального отклонения характеристик выбранного на финальном этапе варианта от изначально наилучшего варианта, а также суммарных затрат на формирование аэродинамического облика. Разработан алгоритм, имитирующий многоэтапный процесс проектирования, в ходе которого осуществляется последовательный выбор наиболее рационального решения из изначального массива вариантов. Сформирована базовая зависимость стоимости получения одного стандартного набора аэродинамических характеристик от точности. По результатам математического моделирования получены характерные зависимости между описывающими процесс проектирования параметрами, что позволяет рекомендовать рациональные подходы при различном изначальном числе вариантов.

Ключевые слова: аэродинамическое проектирование, точность, стоимость, скорость сходимости.

Введение. Задачи аэродинамического проектирования являются одними из наиболее ресурсоемких при создании транспортных систем (летательных аппаратов, автомобилей, скоростных поездов и т.д.), проектировании зданий и сооружений и, зачастую, определяют их

технико-экономические показатели, а также сроки и стоимость разработки. Методы аэродинамического проектирования базируются на научных достижениях в области механики сред, вычислительной техники, численных методов, теории и практики эксперимента. На данный момент существуют различные методы аэродинамического проектирования:

– инженерные методы;

– методы вычислительной газовой динамики;

– экспериментальные методы.

Приведенные методы отличаются точностью оценок аэродинамических характеристик и потребными ресурсами.

В последнее время инженерные методы, чаще всего базирующиеся на аппроксимационных зависимостях и обобщении экспериментальных данных [1-11], используются в ограниченном объеме, поскольку они плохо интегрированы в современные CAD-системы и, невзирая на низкие потребные вычислительные ресурсы, предъявляют весьма высокие требования к квалификации специалистов.

Гораздо более распространены методы вычислительной газовой динамики [12-17]. Они обеспечивают более точные результаты и в большинстве случаев имеют интеграцию с CAD-системами. С точки зрения точности и потребных вычислительных ресурсов данные методы весьма неоднородны. В частности, можно отметить относительно нетребовательные к вычислительным ресурсам панельные методы, в которых решается краевая задача для уравнения Лапласа; более ресурсоемкие методы, основанные на решении краевой задачи для осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса; крайне требовательные к ресурсам методы отсоединенных вихрей (DES) и крупных вихрей (LES).

Экспериментальные методы [17-20] чрезвычайно ресурсоемки и, чаще всего, применяются на финальных этапах разработки, либо при исследовании процессов, плохо описываемых численными методами.

В результате возникает ситуация, когда имеется широкая номенклатура инструментов аэродинамического проектирования, потенциально позволяющих использовать на каждом этапе разработки средства, наиболее адаптированные для задач данного этапа: на ранних этапах менее ресурсоемкие, но и менее точные, а на последующих – более ресурсоемкие, но при этом и более точные. Но на практике чаще всего предпочтение отдается какому-то одному инструменту, обычно CAE-системе на базе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. И данный инструмент используется на всех этапах разработки: и там, где его возможности избыточны, и там, где его точности уже недостаточно. Вследствие этого возникают предпосылки к нерациональному использованию ресурсов в процессе аэродинамического проектирования, что может привести и к перерасходу средств, и к снижению характеристик разрабатываемых изделий.

Таким образом, возникает актуальный вопрос поиска рациональной структуры средств аэродинамического проектирования на всех этапах создания новых и модернизации существующих систем, являющийся целью данной работы.

Для достижения обозначенной цели предлагается решить следующие задачи:

– формализация задачи аэродинамического проектирования в терминах точности инструмента, потребных ресурсов, максимальной ошибки определения показателей качества наиболее рационального варианта;

– составление математической модели оценки ошибок и затрат ресурсов в процессе аэродинамического проектирования;

– математическое моделирование различных подходов к аэродинамическому проектированию и их сравнение.

Формализация задачи аэродинамического проектирования. Процесс аэродинамического проектирования обычно тесно интегрирован со стадиями общего проектирования, для которого характерно наличие большого количества вариантов на ранних этапах разработки, когда велика степень неопределенности задачи, и постепенное их уменьшение по мере проработки конструкции на последующих этапах с выходом в итоге на одно компромиссное по совокупности критериев решение. Высокий уровень обеспечиваемых аэродинамических характеристик при этом является важным, но не единственным критерием, определяющим итоговый облик [21-23]. В рамках данного исследования будем рассматривать обобщенный инструмент проектирования, обладающий двумя характеристиками: точность и ресурсы, необходимые для его использования.

Под инструментом проектирования в общем можно понимать различные средства анализа и разработки, применяемые в ходе создания и модернизации технических систем. В данной работе будем считать, что инструмент проектирования представляет собой средство анализа аэродинамических характеристик разрабатываемого объекта. Под точностью инструмента будем понимать максимальную относительную ошибку определения величины оцениваемой аэродинамической характеристики.

Ресурсы, необходимые для использования инструмента, в общем случае могут включать в себя затраты на программное обеспечение (лицензии и техническую поддержку), на вычислительные ресурсы (содержание собственной вычислительной инфраструктуры либо аренду вычислительных мощностей), на оплату труда сотрудников, на эксплуатацию экспериментальной базы, на аренду площадей и другие виды расходов. Все эти затраты могут быть приведены к некоторому стоимостному эквиваленту, в связи с чем в дальнейшем потребные ресурсы будем оценивать через стоимость. Под стоимостью будем понимать затраты в условных единицах стоимости (у.е.с.) на получение одного стандартного набора аэродинамических характеристик. За 1 у.е.с. в рамках данного исследования примем стоимость при использовании инструмента, обеспечивающего максимальную точность.

В зависимости от исходных данных (сложности системы, имеющихся ресурсов, потребности в той или иной системе и т. д.) процесс проектирования может характеризоваться различной скоростью перехода от большого числа вариантов на начальных этапах к единственному варианту

в конце. В рамках данного исследования будем использовать понятие скорость сходимости, которую количественно будем оценивать по степени уменьшения массива вариантов на каждом этапе:

$$V = \frac{n_{i+1}}{n_i},$$

где V – скорость сходимости; n_i – количество рассматриваемых вариантов на текущем этапе проектирования; n_{i+1} – количество рассматриваемых вариантов на следующем этапе проектирования.

В процессе исследования предлагается рассмотреть два подхода:

– использование на всех этапах проектирования одного инструмента аэродинамического проектирования;

– использование разных инструментов аэродинамического проектирования в зависимости от этапа (чем более поздний этап проектирования, тем выше точность инструмента и его стоимость).

В данной работе в качестве критерия, по которому происходит отбор вариантов в процессе проектирования, рассматривалась максимизация абстрактного параметра, отражающего уровень аэродинамических характеристик (таким параметром может выступать, например, аэродинамическое качество). Для универсализации методики использовались относительные значения данного параметра, то есть рассматривались значения от 0 до 1.

Математическая модель. Поиск оптимального варианта происходил по следующему алгоритму:

1) рассматривалось n вариантов, для которых генерировался массив фактических значений определяемого параметра C_j;

2) на основе массива фактических значений параметра C_j генерировался массив значений искомого параметра, определенных с помощью инструмента аэродинамического проектирования:

$$\tilde{C_j} = C_j + C_\delta,$$

где C_δ – случайная величина, заданная равномерным законом распределения на отрезке $[-\delta, +\delta]$, где δ – максимальная относительная ошибка определения величины параметра C_j;

3) варианты ранжировались в порядке убывания $\tilde{C_j}$;

4) массив из n вариантов, ранжированных в порядке убывания $\tilde{C_j}$, уменьшался на $m = 1 - \frac{1}{V}$ вариантов, начиная с конца (исключались варианты с наименьшими значениями $\tilde{C_j}$);

5) пункты 2 – 4 повторялись до тех пор, пока не оставался один вариант;

6) определялось, насколько фактическое значение искомого параметра для оставшегося единственного варианта отличается от действительного значения максимума для изначального массива из n вариантов:

$$d = \frac{C_f}{C_r} - 1,$$

где C_f – фактическое значение искомого параметра для оставшегося по итогам проектирования варианта; C_r – действительное значение максимума;

7) пункты 1 – 6 повторялись N раз, после чего выполнялся статистический анализ относительного отклонения d и определялось предельное отклонение, характеризующее максимальную возможную ошибку в процессе расчета.

Для определения итоговых затрат на аэродинамическое проектирование определена зависимость стоимости получения одного стандартного набора аэродинамических характеристик от точности в относительных величинах (рис. 1). Данная оценка проводилась исходя из того, что для достижения максимальной точности требуется привлечение экспериментальных методов, а минимальная точность достигается при использовании инженерных методов. В некоторых аспектах кривая на рис. 1 может носить субъективный характер, но в целом она является типичной для широкого класса систем: по мере приближения к предельным значениям (максимальной точности, наибольшей скорости, наименьшей массе и т.д.) стоимость этих систем возрастает все более интенсивно и каждый новый процент эффективности в области асимптоты требует на порядок больших затрат, чем при нахождении на отдалении от предельных значений. Кроме того, представленная на рис. 1 кривая согласуется с экономическим законом убывающей отдачи (законом убывающей предельной производительности) [24], согласно которому увеличение одного из факторов производства (в нашем случае вычислительных мощностей, размеров расчетных сеток, квалификации специалистов и т.д.) сверх определённых значений обеспечивает прирост результата (в нашем случае точности) на всё меньшую величину.

Общая стоимость выбора наиболее рационального варианта в процессе аэродинамического проектирования определялась исходя из соотношения:

$$S_{\text{общ}} = \sum_{i=0}^{k-1} S_i \left\lfloor \frac{n}{V^i} \right\rfloor,$$

где $S_{\text{общ}}$ – общая стоимость; S_i – стоимость получения одного стандартного набора аэродинамических характеристик; k – количество итераций (этапов) для выбора наиболее рационального значения, $k = \lfloor \log_V n \rfloor$.

Расчет по описанному алгоритму проводился при N = 1000. Для полученного массива отклонений расчетных максимумов от фактических определялось предельное отклонение, характеризующее максимальную возможную ошибку в процессе расчета.

В ходе исследования рассматривались как подходы, когда на всех этапах поиска применялся один и тот же инструмент с определенной точностью, так и подходы, при которых точность применяемых инструментов варьировалась в процессе поиска максимального значения. При рассмотрении инструментов с различными точностями на первой итерации расчет проводился с точностью $\delta_0 = 0{,}2$, а на последней – $\delta_k = 0{,}05$. На промежуточных итерациях точность расчета выбиралась в зависимости от номера текущего этапа (пропорционально числу оставшихся в рассмотрении вариантов):

$$\delta_i = \frac{\delta_0 + \left(2^i - 1\right)\delta_k}{2^i},$$

где δ_i – максимальная относительная ошибка определения аэродинамических характеристик на i-м этапе; δ_0 – максимальная относительная ошибка определения аэродинамических характеристик на первом этапе; δ_k – максимальная относительная ошибка определения аэродинамических характеристик на последнем этапе.

Также в процессе исследования рассматривались случаи, когда процесс выбора наиболее рационального варианта происходил из n = (20, 100, 1000) вариантов, при скорости сходимости V = (2, 4, 8).

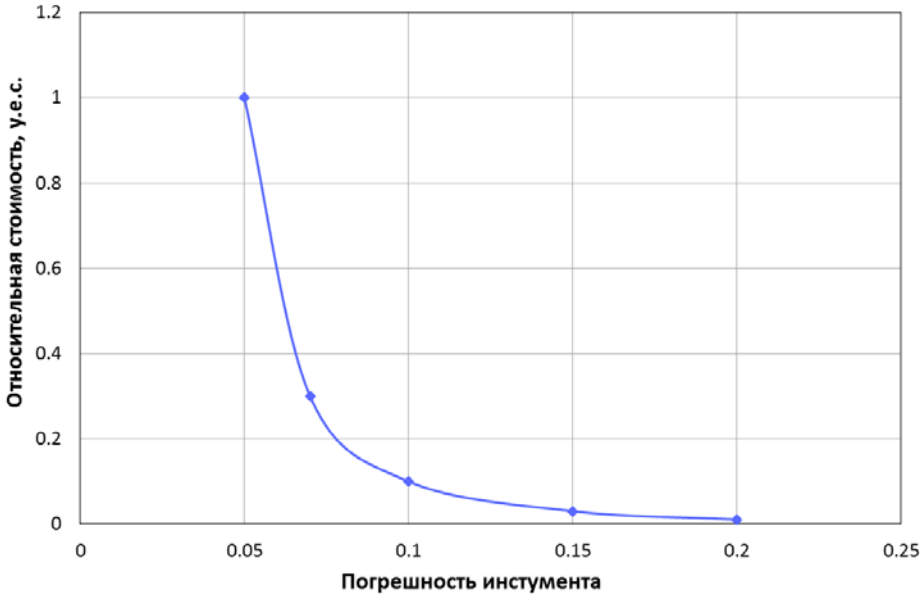


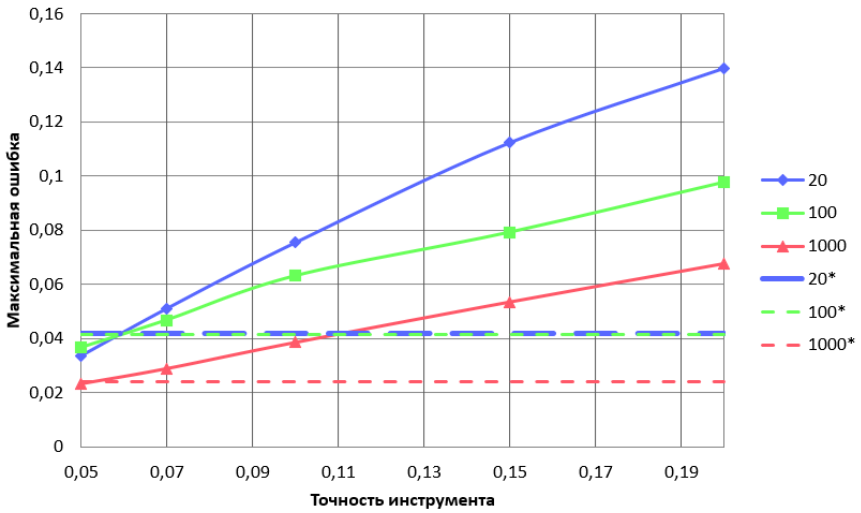
Рис. 1. Зависимость относительной стоимости получения одного стандартного набора аэродинамических характеристик от погрешности получаемого результата

Результаты математического моделирования. Полученные по результатам исследования зависимости ошибки определения максимума от точности используемого инструмента приведены на рис. 2.

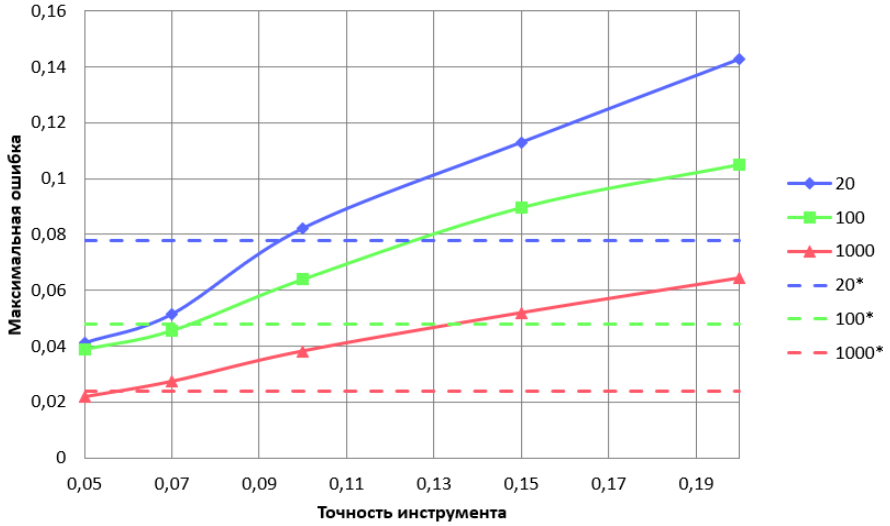
Далее на рисунках для графиков приняты следующие обозначения: цифра обозначает размер изначального массива вариантов, цифра в скобках – скорость сходимости, звездочка – использование инструментов с изменяющейся в процессе проектирования точностью.

Из представленных графиков видно, что при одинаковой точности расчета на всех итерациях ошибка определения максимума практически не зависит от скорости сходимости. При этом, максимальная ошибка по итогам проектирования сильно зависит от изначального числа вариантов: чем меньше вариантов, тем больше ошибка. И эта разница тем сильнее, чем менее точный инструмент используется. Это обусловлено тем, что при малом числе вариантов велика цена неверного выбора, в то время как при большом количестве вариантов расхождение между лучшими решениями не так велико. Это свидетельствует о том, что при малом числе вариантов и подходе

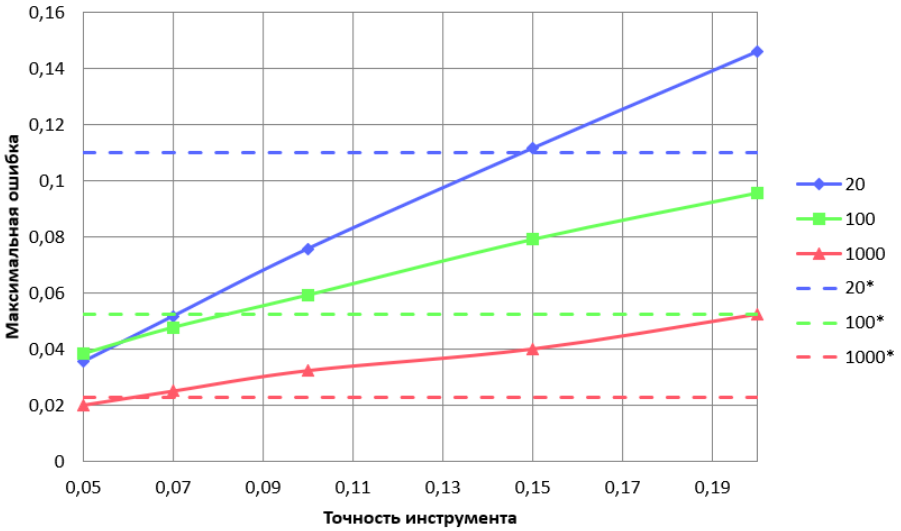
с применением одного инструмента на всех этапах проектирования более рационально использовать точные инструменты.



а



б



в

Рис. 2. Зависимости ошибки определения максимума от точности применяемого инструмента при скорости сходимости 2 (а), 4 (б), 8 (в)

Однако для вариантов с переменной точностью расчета на разных итерациях при увеличении скорости сходимости усиливается зависимость максимальной ошибки от изначального количества вариантов. При скорости сходимости V = 2 для любого изначального количества вариантов имеет место лишь незначительное увеличение ошибки ((0,05 – 0,7) процентных пункта) даже по сравнению с использованием инструмента с точностью 0,05 на всех итерациях. При V = 4 расчеты с переменной точностью для изначального массива из 20 вариантов дают ошибку, сопоставимую с использованием инструмента с точностью 0,1; при V = 8 – сопоставимую с использованием инструмента с точностью 0,15. При этом для изначального массива из 100 вариантов увеличение ошибки составляет (0,5 – 1,5) процентных пункта по сравнению с использованием инструмента с точностью 0,05 на каждой итерации для различных скоростей сходимости, для изначального массива из 1000 вариантов – (0,05 – 0,3) процентных пункта.

Таким образом, можно констатировать, что применение на разных этапах разработки инструментов с различной точностью позволяет по итогам проектирования получить точность, близкую к максимальной, во всех случаях, кроме случаев с малым изначальным количеством вариантов и высокой скоростью сходимости.

Полученные зависимости итоговой стоимости от точности инструмента при различном количестве исходных вариантов и разной скорости сходимости процесса проектирования приведены на рис. 3.

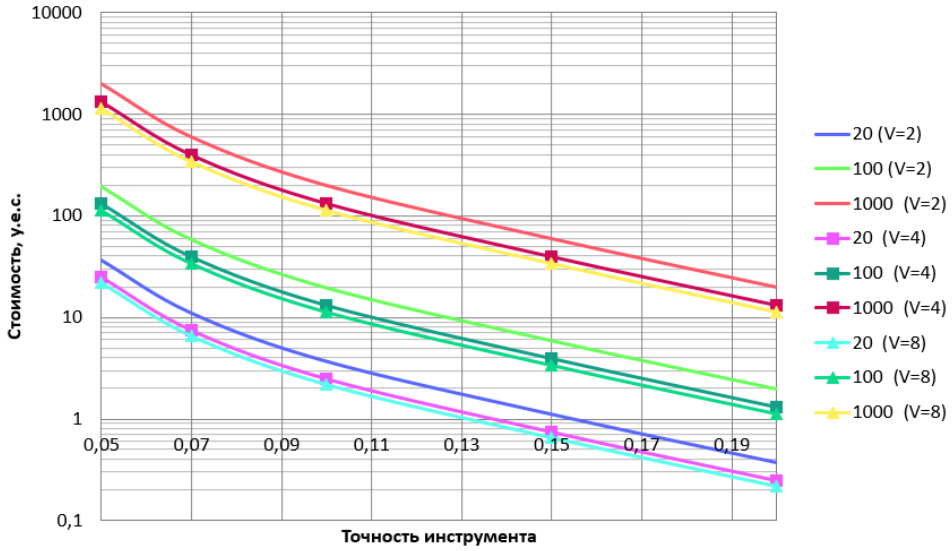


Рис. 3. Зависимость итоговой стоимости проектирования от точности применяемого для получения аэродинамических характеристик инструмента

Как видно из рис. 3 увеличение начального количества вариантов не изменяет общей картины роста итоговой стоимости по мере увеличения точности (уменьшения погрешности) инструмента. В целом полученная зависимость повторяет характерную базовую кривую стоимости от точности (рис. 1).

Так же необходимо отметить, что по мере увеличения скорости сходимости (уменьшения числа этапов проектирования) обусловленное этим снижение итоговой стоимости становится все менее ярко выраженным (рис. 4). Более того, из рис. 3 и рис. 4 видно, что изменение скорости сходимости оказывает значительно меньший вклад в итоговую стоимость проектирования по сравнению с изменением количества рассматриваемых вариантов или точности используемого инструмента. Это свидетельствует о том, что с точки зрения экономии ресурсов нет смысла радикально сокращать количество этапов проектирования, поскольку основные затраты все равно сосредоточены на начальном этапе.

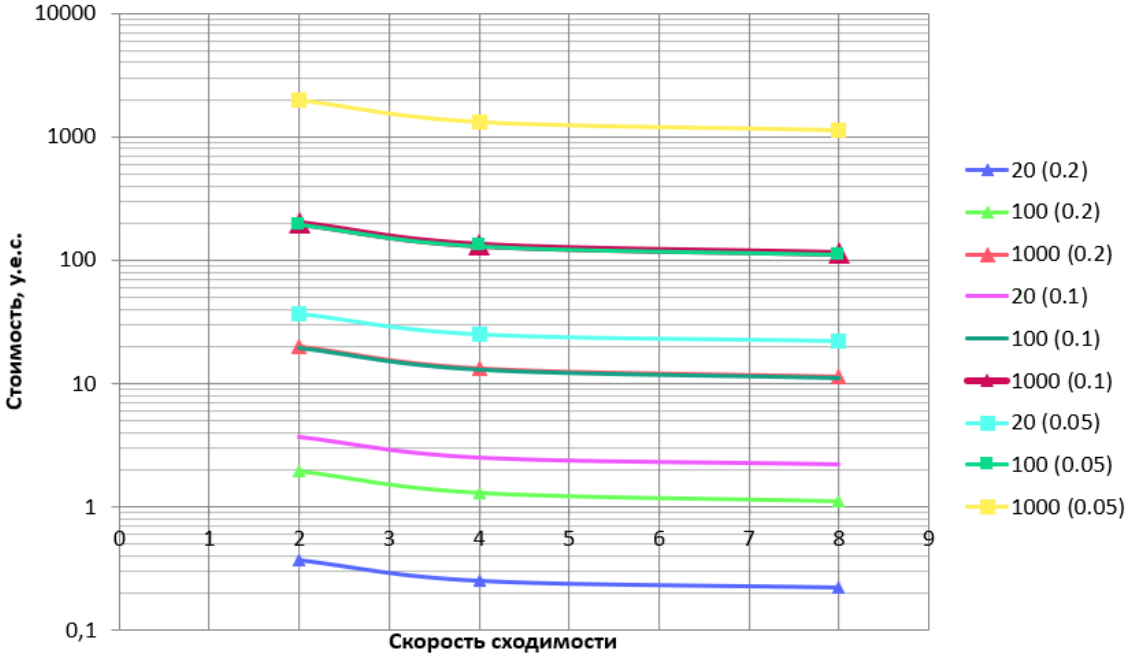


Рис. 4. Зависимость итоговой стоимости проектирования от скорости сходимости

Значительный интерес представляет то, каким образом будут меняться затраты и точность по итогам проектирования при использовании различных инструментов на разных этапах: на начальных этапах более грубых и дешевых, а на последующих более точных и ресурсоемких. Результаты такого исследования в сравнении с использованием на всех этапах одинаковых инструментов обобщены на рис. 5.

Из приведенных зависимостей видно, что при одинаковых исходных данных (скорости сходимости и изначальном числе вариантов) применение инструментов с возрастающими от этапа к этапу точностью и стоимостью позволяет снизить расходы на проектирование:

– в (7,9 – 9,3) раза при изначальном числе вариантов n = 1000 (увеличение максимальной ошибки не более чем на 0,3 процентных пункта);

– в (3,7 – 6,2) раза при изначальном числе вариантов n = 100 (увеличение максимальной ошибки не более чем на 1,3 процентных пункта);

– в (0,8 – 7,7) раза при изначальном числе вариантов n = 20 (увеличение максимальной ошибки не более чем на 7,5 процентных пункта).

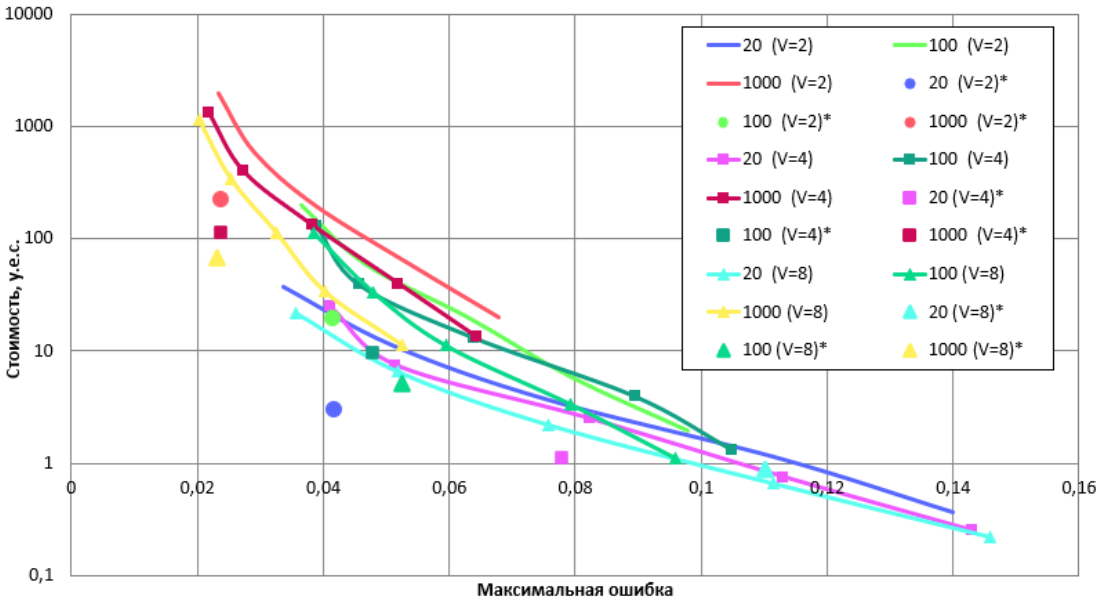


Рис. 5. Зависимость итоговой стоимости аэродинамического проектирования от максимальной ошибки при применении на всех этапах инструментов с одинаковой и различной точностью

Иными словами, во всех рассмотренных случаях, за исключением сочетания изначального массива из 20 вариантов и скорости сходимости V = 8, подход с различными в зависимости от этапов инструментами демонстрирует возможность снижения затрат практически на порядок по сравнению с применением одного инструмента, обеспечивающего практически такую же итоговую ошибку. При этом потенциально возможное уменьшение итоговой ошибки за счет использования более точного и ресурсоемкого инструмента на всём протяжении аэродинамического проектирования не превышает 1,3 процентных пункта в случае n ≥ 100 и 3,8 процентных пункта в случае n ≥ 20, то есть является незначительным. Таким образом, можно говорить о том, что если имеет место достаточно большой массив изначальных вариантов и планируется более 2 этапов уточнения аэродинамических характеристик, то подход с различными инструментами является более предпочтительным, поскольку практически без потери точности обеспечивает кратное снижение итоговых затрат (до 9,3 раза) по сравнению с применением какого-либо одного инструмента для всех стадий разработки.

Для реализации обозначенного выше потенциала необходимо использовать всю линейку методов, начиная с грубых, но доступных, инженерных, продолжая средними по точности и стоимости методами вычислительной газовой динамики и заканчивая точными, но крайне ресурсоемкими, экспериментальными. Из обозначенных методов необходимо отметить инженерные, роль которых, согласно проведенному исследованию,

является одной из основных в снижении итоговой стоимости. Они должны дешево и приемлемо точно проводить первичный отсев большого числа вариантов на ранних этапах и именно здесь формируется основная часть экономии. Проблема состоит в том, что данные методы все реже применяются на практике, поскольку они не вписаны в современные цифровые технологии проектирования, зачастую являются частными, не обладают должной степенью универсальности, требуют высокой квалификации и опыта тех, кто с ними работает.

В данном контексте значительный интерес представляет использование искусственных нейронных сетей для задач обобщения информации и последующей экспресс-оценки аэродинамических характеристик [25, 26], что потенциально может позволить сочетать разрозненные инженерные методики, многочисленный задел в области аэродинамического проектирования, новые результаты.

Заключение. По итогам исследования можно заключить, что применение на разных этапах проектирования инструментов с различной точностью позволяет получить ошибку в выборе наиболее рационального решения, близкую к минимальной, за исключением случаев с малым изначальным размером массива вариантов и высокой скоростью сходимости. Кроме того данный подход позволяет снизить расходы на проектирование до 9,3 раза при практически неизменном уровне итоговой точности (максимальная ошибка возрастает не более чем на 1,3 процентных пункта). Также определено, что с точки зрения экономии ресурсов на проектирование уменьшение количества его этапов не является рациональным, так как это оказывает значительно меньшее влияние на итоговую стоимость разработки, чем изменение точности используемого инструмента или количества рассматриваемых вариантов. Таким образом, можно констатировать, что рациональной стратегией при проектировании является увеличение точности инструмента и его стоимости по мере продвижения от начальных стадий разработки к финальным с сохранением разумного количества этапов проектирования.

Тем не менее, как было отмечено выше, инженерные методики аэродинамических расчетов плохо развиты в плане интеграции с CAD-системами, удобства использования, доступности широкому кругу пользователей, что не позволяет в полной мере реализовать рациональную структуру процесса проектирования. Таким образом, на данный момент является крайне актуальной задача развития программных комплексов экспресс-оценки аэродинамических характеристик, взаимодействующих с CAD-системами, имеющих точностью порядка 20%, но существенно меньшую, чем у более точных инструментов, стоимость получения одного стандартного набора аэродинамических характеристик.

Список литературы

1. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов: учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Машиностроение, 1973. 616 с.

2. Дракин И.И. Основы проектирования беспилотных летательных аппаратов с учетом экономической эффективности. М.: Машиностроение, 1973. 224 с.

3. Кашафутдинов С.Т., Лушин В.Н. Атлас аэродинамических характеристик крыловых профилей / Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина, 1994. 75 с.

4. Васильев В.В., Морозов Л.В., Шахов В.Г. Расчет аэродинамических характеристик летательных аппаратов: учеб. пособие / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1993. 79 с.

5. Орлов А.Р., СатаровА.В.. Прикладная аэродинамика беспилотных летательных аппаратов: учебное пособие / Тул. Гос. ун-т. Тула, 2003. 132с.

6. Микеладзе В.Г., Титов В.М. Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолетов и ракет: справочник. М.: Машиностроение, 1982. 149 с.

7. Аэродинамика летательных аппаратов: учебник / под ред. Бураго С.Г. М.: РУСАЙНС, 2024. 173 с.

8. Петров К.П. Аэродинамика элементов летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1985. 272 с.

9. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов / под ред. Г.С. Бюшгенса. М.: Наука. Физматлит, 1998. 816 с.

10. Кюхеман Д. Аэродинамическое проектирование самолетов. Пер. с англ. / Пер. Н.А. Благовещенский, Г.И. Майкапар; Под ред. Г.И. Майкапара. М.: Машиностроение, 1983. 656 с.

11. Торенбик Э. Проектирование дозвуковых самолетов: пер. с англ. / Пер. Е.П. Голубков. М.: Машиностроение, 1983. 648 с.

12. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1982. 392 с.

13. Белоцерковский О.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. М.: Наука, 1985. 256 с.

14. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.

15. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 520 с.

16. Галкин В.С., Русаков С.В. О статусе уравнений Навье-Стокса в газодинамике (обзор) // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 1. С. 156-173.

17. Брутян М.А., Вышинский В.В., Ляпунов С.В. Основы дозвуковой аэродинамики / Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского. М.: Наука, 2021. 296 с.

18. Гныря А.И., Коробков С.В., Кошин А.А. и др. Комплексные экспериментальные исследования аэродинамики и тепломассообмена зданий и сооружений // Вест. ТГА-СУ. 2011. №4. С. 113-126.

19. Мартынов А.К. Прикладная аэродинамика. М.: Машиностроение, 1972. 448 с.

20. Прикладная аэродинамика / под ред. Краснова Н.Ф. Учеб. Пособие для втузов. М.: Изд-во Высшая Школа, 1974. 732 с.

21. Ветров В.В., Дикшев А.И., Костяной Е.М., Шилин П.Д. Баллистическая эффективность летательных аппаратов: учеб. пособие для студентов вузов / Под ред. проф. д-ра техн. наук В.В. Ветрова. Тула. Изд-во ТулГУ, 2023. 210 с.

22. Ветров В.В., Дикшев А.И., Дунаев В.А., Костяной Е.М. Морозов В.В. О концепции повышения баллистической эффективности летательных аппаратов с доминирующим энергопассивным участком траектории // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 2. С. 23 - 28.

23. Ветров В.В., Гусев А.В., Дикшев А.И., Костяной Е.М., Кузнецов В.М. О баллистической эффективности бикалиберных летательных аппаратов с доминирующим энергопассивным участком траектории // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 4. С. 3 - 8.

24. Нуреев Р.М. Курс микроэкономики: учебник для вузов. М.: НОРМА, 2001. 572 с.

25. Губарев М.А., Костяной Е.М., Степанов А.М., Ширяев А.А. Формирование обучающей выборки на основе трехмерных геометрий и аэродинамических характеристик// XXII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых "Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов". Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. С. 52 – 62.

26. Ветров В.В., Губарев М.А., Костяной Е.М., Степанов А.М., Ширяев А.А. Вариант использования искусственных нейронных сетей для задач предварительного аэродинамического проектирования // Фундаментальные основы баллистического проектирования: IX Всероссийская научно-техническая конференция. Санкт-Петербург, 24-29 июня 2024 г.: Сборник материалов. Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2024. С. 73 – 74.

Ветров Вячеслав Васильевич, д-р техн. наук, профессор, vvvetr@mail.ru, Россия Тула, Тульский государственный университет,

Губарев Максим Алексеевич, студент, gubarev.maksim.006@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Костяной Евгений Михайлович, канд. техн. наук, доцент, ekostyanoy@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Степанов Александр Михайлович, студент, tvodr.alexan@gmail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ширяев Александр Андреевич, аспирант, moldchaga@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF RATIONAL APPROACHES TO AERODYNAMIC DESIGN

V.V. Vetrov, M.A. Gubarev,
E.M. Kostyanoy, A.M. Stepanov, A.A. Shiraev

The article provides an overview of the approaches used in aerodynamic design. It is noted that in practice there are prerequisites either for the irrational use of resources, or for a deterioration in the quality of design results due to the use of the same tool at all stages of development. It is proposed to compare approaches that use the same tools at different stages of design with approaches in which the cost and accuracy of the tool vary from stage to stage. The task is formalized in a statistical formulation in terms of the accuracy and cost of the tool, the rate of convergence of the design process, the maximum deviation of the characteristics of the option selected at the final stage from the initially best option, as well as the total cost of forming an aerodynamic appearance. An algorithm has been developed that simulates a multi-stage design process, during which the most rational solution is consistently selected from the initial array of options. The basic dependence of the cost of obtaining one standard set of aerodynamic characteristics on accuracy is formed. Based on the results of mathematical modeling, characteristic dependencies between the parameters describing the design process have been obtained, which allows us to recommend rational approaches with a different initial number of variants.

Key words: aerodynamic design, accuracy, cost, convergence of rate.

Vetrov Vyacheslav Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, professor, vvvetr@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Gubarev Maksim Alekseyevich, student, gubarev.maksim.006@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kostyanoy Evgeny Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, ekostyanoy@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Stepanov Alexander Mikhailovich, student, tvodr.alexan@gmail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Shiryaev Alexander Andreevich, postgraduate, moldchaga@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.94
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-266-267

СТРУКТУРА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Тун Мин У, С.А. Лупин

В работе представлена структура имитационной модели системы общественного транспорта, ориентированная на ее реализацию в среде AnyLogic. Описаны основные этапы создания модели, включая сбор данных, их обработку и внедрение в программную среду для имитационного моделирования транспортных процессов. Рассмотрены возможности интеграции в модель ГИС-карт для обеспечения реалистичного представления географического положения транспортных узлов и маршрутов, а также повышения точности моделирования. Предложенная структура позволяет проводить анализ эффективности транспортной системы, оценивать варианты оптимизации различных схем движения. Работа может быть полезна для специалистов, занимающихся вопросами планирования и модернизации систем общественного транспорта.

Ключевые слова: имитационное моделирование, общественный транспорт, ГИС, AnyLogic.

Введение. Оптимизация работы общественного транспорта (ОТ) — ключевая задача для крупных городов и агломераций, где интенсивный пассажиропоток и ограниченные ресурсы требуют точного планирования и эффективного управления транспортной системой. Имитационное моделирование, как метод исследования, позволяет воспроизвести и проанализировать различные аспекты функционирования общественного транспорта, выявить узкие места и протестировать возможные решения, не вмешиваясь в реальную инфраструктуру [1-3]. AnyLogic является одной из самых популярных платформ для создания моделей транспортных систем, поскольку она сочетает в себе мощные аналитические возможности и гибкость настройки. Благодаря поддержке агентного, системно-динамического и дискретно-событийного подходов AnyLogic позволяет детально прорабатывать такие аспекты, как маршруты транспортных средств, расписания, пассажиропотоки, а также взаимодействие транспортных агентов с инфраструктурой [3-5]. Кроме того, встроенные инструменты работы с GIS-данными дают возможность создавать модели на основе реальных географических данных, что повышает точность и применимость результатов моделирования.

В статье рассматривается структура модели ОТ, построенной в AnyLogic, описаны её основные компоненты, их взаимодействие и методы настройки. Подробно представлен процесс задания агентной структуры, маршрутов и расписаний, моделирования пассажиропотоков и использование геоинформационных данных.

Методы моделирования в AnyLogic. Агентное моделирование является в AnyLogic основным методом, позволяющим описывать транспортные системы как совокупность отдельных агентов с индивидуальным

поведением и характеристиками. Агенты представляют собой самостоятельные единицы, которые в модели общественного транспорта могут включать такие объекты, как автобусы, пассажиры. Каждый агент обладает уникальными свойствами и поведением, что позволяет гибко настраивать их взаимодействие. Преимущества агентного моделирования в AnyLogic заключаются в том, что оно позволяет учитывать поведение каждого агента отдельно, что характерно для систем общественного транспорта, где разные виды транспорта и пассажиры взаимодействуют друг с другом [6-7].

Дискретно-событийное моделирование применяется для анализа событий, происходящих в системе, и позволяет учитывать процесс с точки зрения событий и состояний. В AnyLogic этот метод полезен для моделирования процессов, связанных с расписанием и загрузкой транспорта. События в модели общественного транспорта могут включать такие действия, как посадка пассажиров, прибытие и отправление транспортного средства, перемещение на следующую остановку, обработку очередей и загрузки. Преимущества дискретно-событийного моделирования заключаются в его способности четко описывать и управлять сложными процессами с временной привязкой, что позволяет отслеживать этапы работы ОТ и корректировать параметры в зависимости от загруженности системы [8-9].

ГИС-моделирование — это подход, который позволяет интегрировать в модель реальные географические данные, например, карту города и инфраструктуру транспортных линий. Использование ГИС-карт особенно полезно для построения моделей ОТ, так как обеспечивает реалистичное представление пространственного расположения маршрутов и остановок. Использование ГИС позволяет задавать координаты остановок, учитывать реальную протяженность маршрутов и их особенности (например, повороты, расстояния между станциями), что способствует точности модели. Преимущества ГИС-моделирования: оно позволяет модели быть ближе к реальной системе, что особенно важно для оценки эффективности и последующей оптимизации системы [10].

Структура модели транспортной системы. В настоящее время имитационное моделирование обеспечивает проведение анализа работы сложных систем и позволяет найти оптимальные решения задачи управления с учетом изменчивости внешних факторов. Выбор в качестве среды моделирования системы AnyLogic определен тем, что она позволяет создавать гибридные объектно-ориентированные модели, включающие как Java-код, так и широкую палитру многофункциональных библиотек. Интеграция элементов ГИС позволяет существенно сократить затраты на разработку имитационной модели и сделать ее максимально адекватной объекту исследования.

Планирование работы ОТ является одной из сложных задач, связанных с управлением городской инфраструктурой. С точки зрения теории ОТ традиционно рассматривается как система массового обслуживания, где запросы формируются потоками пассажиров, а транспортные единицы являются исполнительными элементами или обработчиками. В управлении ОТ

широко используются информационные и контрольные системы, обеспечивающие эффективность его функционирования [11-13].

Создание гибридной имитационной модели в среде AnyLogic начинается с определения структуры ее классов и задания логики работы.

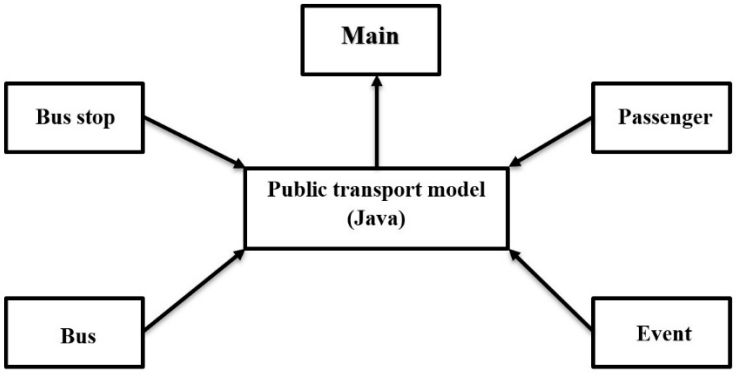


Рис. 1. Структура имитационной модели ОТ

Класс «*Main*». В AnyLogic класс «Main» относится к главной модели или главному агенту, с которого начинается выполнение симуляции. Это основной класс, который создается по умолчанию при разработке новой модели и объединяет все остальные классы. Класс «*Main*» представляет верхнеуровневую среду, в которой могут существовать другие агенты, элементы, диаграммы, блоки процессов и так далее. Для исследования времени обслуживания пассажиров в этом классе используются переменные и параметры модели общественного транспорта.

Класс «*Bus stop*». Класс «*Bus stop*» предназначен для размещения автобусных остановок на карте ГИС. Координаты автобусных остановок загружаются в AnyLogic из внешней базы данных, которая содержит их широту и долготу (Рис.2).

Исторические центры городов, обладая уникальной архитектурой и сложившейся планировкой, часто создают значительные сложности для развития современного общественного транспорта. Основные препятствия связаны с узкими улицами, плотной застройкой, ограничениями на движение транспорта, а также необходимостью сохранения культурного наследия. В итоге, исторические центры создают много вызовов для ОТ, но при грамотном планировании можно найти решения, которые сохраняют культурное наследие и обеспечат удобное передвижение жителей и туристов.

Класс «*Bus*». В этом классе для обеспечения движения автобусов, посадки, высадки и пересадки пассажиров использована диаграмма состояний (*Statechart*), которая представляет собой мощный инструмент для моделирования сложных динамических систем. Она описывает, как объект (или агент) изменяет свое состояние в зависимости от времени и событий. Диаграмма состояний класса «*Bus*» включает следующие состояния (Рис.3):

BusAtStation – прибытие автобуса на остановку маршрута;

Load_unload – посадка и высадка пассажиров на остановке;

MoveTo – отъезд от остановки;
BackTo – переход к обратному маршруту.

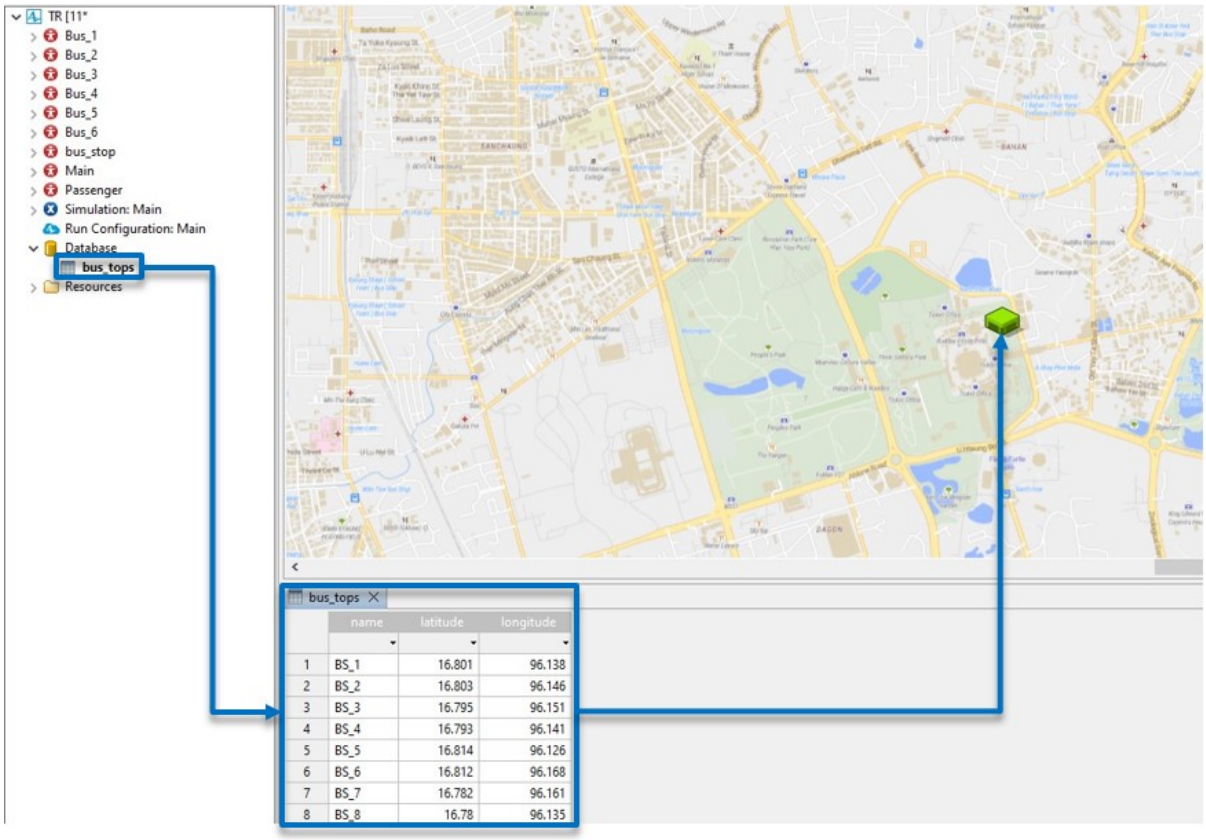


Рис. 2. Размещение остановок на карте ГИС

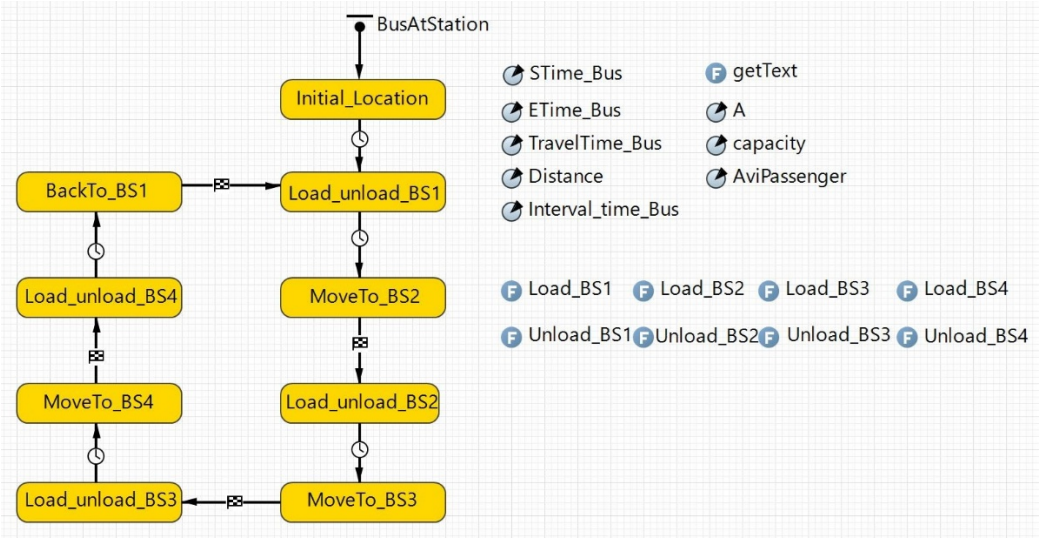


Рис. 3. Диаграмма состояний и функции класса «Bus»

Java-программы в AnyLogic дают пользователям возможность комбинировать объектно-ориентированное программирование с элементами симуляции и визуализации. Это создает условия для разработки гибких, масштабируемых и высокопроизводительных моделей.

Класс «*Passenger*». В этом классе функция *passengerfunction_BS$_1$( )* реализует прибытие пассажиров на автобусные остановки, фиксирует время их появления и посадки в автобус:

```
if(from == bus_stops.get(x) && to == bus_stops.get(y))
{ bus_stops.get(x).a_y ++;
bus_stops.get(y).p_x ++;
passengersAt_1 ++; }
```

Экспериментальные результаты моделирования. В ходе экспериментов, проведенных на основе разработанной модели в среде AnyLogic, были получены результаты, отражающие функционирование транспортной системы при различных условиях. Основное внимание уделялось анализу параметров движения автобусов, времени ожидания пассажиров на остановках и общей загруженности маршрутов. Результаты экспериментов подтверждают, что использование геоинформационных данных в сочетании с инструментами AnyLogic предоставляет возможность точного анализа транспортных потоков и помогает в принятии обоснованных решений для улучшения работы транспортной сети.

Модель для первого эксперимента включает шесть автобусных остановок и автобусные маршруты. Для её реализации использовались геоинформационная система (ГИС), интегрированная в среду моделирования AnyLogic и реальный фрагмент транспортной инфраструктуры города Мандалай, Мьянма (Рис.4).

В ходе симуляций анализировалось время задержки обслуживания пассажиров на каждой остановке для двух схем движения транспорта: беспересадочной (WT), когда между любой парой остановок существует как минимум один маршрут, и схемой движения с пересадками (TR).

Маршруты движения автобусов первого эксперимента приведены в Таблицах 1 и 2, а результаты моделирования для схем WT и TR показаны в Таблице 3.

Таблица 1

Маршруты движения автобусов для схемы WT

Маршрут	*Автобусные остановки*						
Bus1, Bus2	BS_1	BS_2	BS_3	BS_4	BS_5	BS_6	BS_1
Bus3, Bus4	BS_5	BS_4	BS_3	BS_2	BS_1	BS_6	BS_5

Таблица 2

Маршруты движения автобусов для схемы TR

Маршрут	*Автобусные остановки*				
Bus1, Bus2	BS_1	BS_2	BS_3	BS_1	-
Bus3, Bus4	BS_3	BS_4	BS_5	BS_6	BS_3

Таблица 3

Время ожидания пассажиров (минуты)

От остановки	*Схема*	*До остановки*					
		BS_1	*BS_2*	*BS_3*	*BS_4*	*BS_5*	*BS_6*
BS_1	WT		10.9	19.1	7	17.9	24.8
	TR		6.8	6.5	14.8	22.2	19.1

BS_2	WT	18.2		16.1	10.2	8.2	18.5
	TR	4.4		7.6	17.2	18.6	19.2
BS_3	WT	19.1	14.5		14	13.2	12.9
	TR	8.5	8.3		12.9	11.7	10.5
BS_4	WT	8.4	13.8	14.8		15.1	13.6
	TR	18.9	16.2	14.1		7.5	12.3
BS_5	WT	14.2	9.2	12.9	24.4		16.3
	TR	19.6	20.2	6.9	13		9.4
BS_6	WT	13.9	14.5	5.8	23.8	19.8	
	TR	14.6	18.3	10.8	9	9.3	

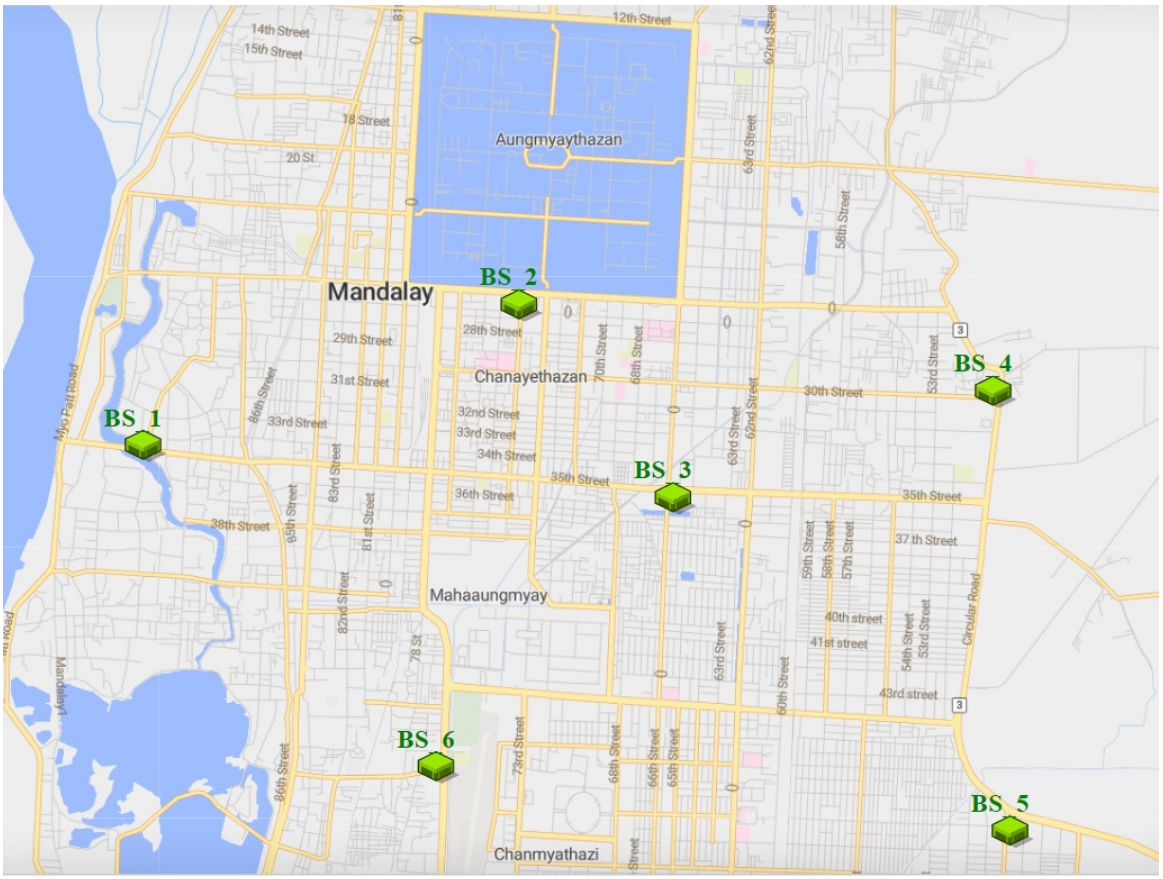


Рис. 4. Фрагмент ГИС-карты первого эксперимента

Результаты моделирования позволяют сравнить различные схемы движения. В таблице цветом выделены лучшие значения для каждой пары остановок. Можно отметить некоторое преимущество схемы TR.

Во втором эксперименте рассматривался реальный фрагмент транспортной инфраструктуры города Янгон, Мьянма (Рис.5). Были проведены исследования эффективности маршрутов WT и TR, оценено время ожидания пассажиров на всех остановках. В этом эксперименте задействовано шесть автобусов, передвигающихся по шести маршрутам. На схеме движения расположены восемь остановок.

Маршруты движения автобусов представлены в Таблицах 4 и 5, а результаты моделирования показаны в Таблице 6.

В этом случае результаты моделирования позволяют выявить значительное преимущество схемы движения с пересадками. Выделенные цветом в Таблице 6 лучшие значения принадлежат именно схеме TR.

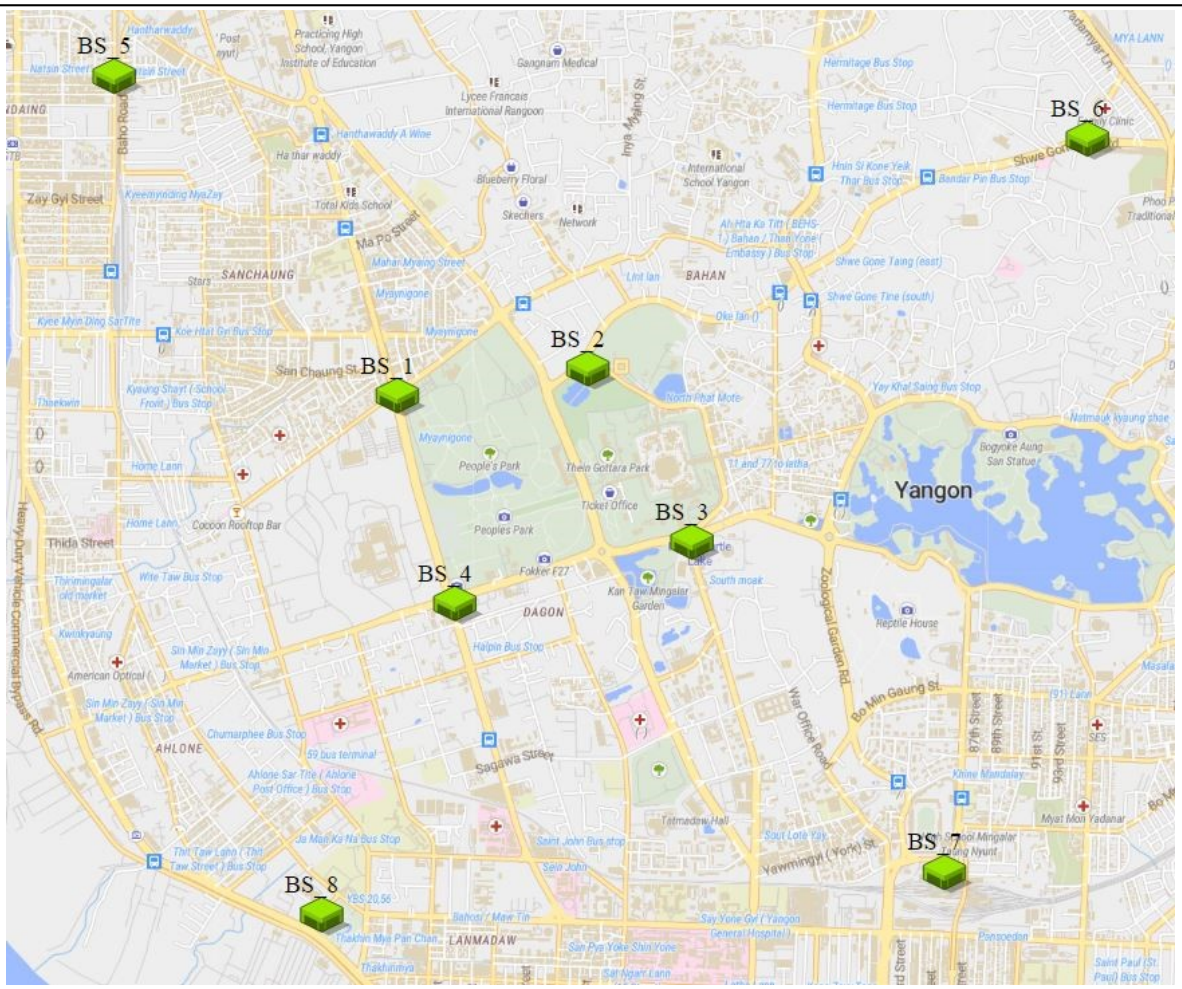


Рис. 5. Фрагмент ГИС-карты второго эксперимента

Таблица.4

Маршруты движения автобусов для схемы WT

Маршрут	*Автобусные остановки*				
Bus1	BS_5	BS_1	BS_4	BS_8	-
Bus2	BS_7	BS_3	BS_2	BS_1	BS_5
Bus3	BS_6	BS_2	BS_1	BS_5	-
Bus4	BS_8	BS_4	BS_1	BS_2	BS_6
Bus5	BS_6	BS_2	BS_3	BS_7	-
Bus6	BS_8	BS_4	BS_3	BS_7	-

Таблица.5

Маршруты движения автобусов для схемы TR

Маршрут	*Автобусные остановки*			
Bus1	BS_1	BS_2	BS_3	BS_4
Bus2	BS_1	BS_2	BS_3	BS_4
Bus3	BS_5	BS_1	-	-
Bus4	BS_6	BS_2	-	-
Bus5	BS_7	BS_3	-	-
Bus6	BS_8	BS_4	-	-

Таблица.6

Время ожидания пассажиров (минуты)

От остановки	*Схема*	*До остановки*							
		BS_1	BS_2	BS_3	BS_4	BS_5	BS_6	BS_7	BS_8
BS_1	WT		7.4	20.1	14.5	7	11.8	20.1	14.5

	TR		4.5	4.5	4.5	5.8	10.2	10.1	12.6
BS_2	WT	7.4		14.1	19.9	10.2	12	14.1	19.9
	TR	4.9		4.9	4.9	11.5	5.6	10	12.1
BS_3	WT	20.1	11.8		16	20.1	15.7	13.7	16
	TR	4.7	4.7		4.7	11.4	10.3	5.6	12
BS_4	WT	11.6	19.9	16		16.1	19.9	16	7
	TR	5	5	5		11.4	10.4	9.5	6.2
BS_5	WT	6.9	9.9	20	15.9		15.5	20	15.9
	TR	6	9.5	9.5	9.5		14.9	14.2	17.1
BS_6	WT	12.7	12.4	15.6	19.7	15.5		15.6	19.7
	TR	10.4	5.6	10.4	10.4	18.6		15.2	17.9
BS_7	WT	19.9	12.9	12.8	16	19.9	15.8		16
	TR	10.3	10.3	5.3	10.3	16.9	16.4		17.9
BS_8	WT	13	19.8	16	7.2	16.1	19.8	16	
	TR	9.3	9.3	9.3	6	15.5	15.9	13.3	

Заключение. Гибридная имитационная модель позволяет детально описать транспортную систему – задать маршруты движения автобусов, расположение остановок и интенсивность потоков пассажиров. Использование в модели ГИС карт делает их эффективным инструментом для планирования схем движения автобусов, оценки оптимальности расписания и местоположения узлов пересадки для разных маршрутов.

Одним из основных критериев эффективности работы общественного транспорта, как системы массового обслуживания, является время задержки обслуживания. Этот параметр и был выбран в модели в качестве главного критерия при сравнении различных схем движения транспорта. Проведенные исследования подтвердили адекватность модели и доказали возможность ее использования для анализа реальных транспортных проблем.

Список литературы

1. Барышников Н.Г., Иванов А.В., Смирнова Е.Н. Имитационное моделирование транспортных систем: подходы, методы и инструменты. М.: Издательство Московского университета, 2020.

2. Воробьев В.В. Моделирование транспортных процессов: Учебное пособие. СПб.: Питер, 2019.

3. Сапрыкин Д.В., Чистяков К.А. Использование AnyLogic для моделирования транспортной инфраструктуры: современные подходы и кейсы. // Транспортные системы и логистика, 2022, № 4. С. 45-55.

4. Гладышев И.А., Кравченко П.И. Геоинформационные системы в транспортном моделировании: теория и практика. Екатеринбург: УрФУ, 2021.

5. Бекетов А.П., Фролов М.И. Агентное моделирование в AnyLogic для анализа и оптимизации пассажиропотоков. // Вестник транспортных исследований, 2023. Т. 12. № 1. С. 73-82.

6. Петров С.В., Ковалев А.И. Агентное моделирование в транспортных системах: методы и применение. Новосибирск: Наука, 2020.

7. Романов Е.М., Сидорова Л.Г. Моделирование общественного транспорта: от теории к практике. М.: Транспортное издательство, 2018.

8. Климов И.А., Селезнев П.Н. Дискретно-событийное моделирование транспортных процессов: теоретические основы и практическое применение. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2021.

9. Зайцев В.Г., Тихонов А.В. Управление пассажирскими потоками в транспортных системах с использованием дискретно-событийного подхода. // Моделирование и анализ систем, 2020, № 3. С. 88-96.

10. Woodhouse S., Lovett A., Dolman P., Fuller R. Using a GIS to select priority areas for conservation // Computers, Environment and Urban Systems, Mar-2000, vol.24. P. 79-93.

11. T. M. Oo., Sergey Lupin, M. T. Khaing., A. Thu. Using Hybrid Modeling for Estimation of the Efficiency of Service Systems // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021. P. 2277-2280.

12. Sergey Lupin, Than Shein, Kyaw Kyaw Lin, Anastasia Davydova. Modelling of the Transport Systems in a Competitive Environment // Proceedings of the Fifth International Conference on Internet Technologies and Applications (ITA 13), Glyndwr University, Wrexham, North Wales, UK, 2013. P. 41-48.

13. Тун Мин У, Лупин С.А. Сравнение результатов аналитического расчёта и имитационного моделирования транспортных систем // International Journal of Open Information Technologies. Vol. 12. No. 5. 2024. С.103 – 108.

Тун Мин У, аспирант, htunmin5045@gmail.com, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

Лупин Сергей Андреевич, канд. техн. наук, профессор, papikam@rambler.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

STRUCTURE OF THE SIMULATION MODEL PASSENGER TRANSPORT SYSTEM

Tun Min Oo, S.A. Lupin

The paper presents the structure of the simulation model of the public transport system, focused on its implementation in the AnyLogic environment. The main stages of the model creation are described, including data collection, their processing and implementation in the software environment for the simulation of transport processes. The possibilities of integrating GIS maps into the model are considered to provide a realistic representation of the geographical location of transport hubs and routes, as well as to increase the accuracy of modeling. The proposed structure allows analyzing the efficiency of the transport system, evaluating options for optimizing various traffic patterns. The work can be useful for specialists involved in planning and modernizing public transport systems.

Key words: simulation modeling; public transport; GIS; AnyLogic.

Tun Min Oo, postgraduate, htunmin5045@gmail.com, Russia, Moscow, National Research University of Electronic Technology,

Lupin Sergey Andreevich, candidate of technical sciences, professor, lupin@miee.ru, Russia, Moscow, National Research University of Electronic Technology

УДК 004.925:004.932
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-275-276

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛГОРИТМА БРЕГМАНА И МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ В СХЕМАХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

Ю.И. Битюков, Ю.И. Денискин, П.Ю. Битюков

Статья посвящена применению стационарных схем подразделений к задачам геометрического моделирования. Вейвлет-коэффициенты разложения начальной последовательности схемы подразделений находится из оптимизационной задачи применением алгоритма Брегмана и метода наименьших квадратов. Даётся сравнение этих алгоритмов.

Ключевые слова: CAD, схема подразделений, вейвлет, геометрическое моделирование, обработка изображений.

Введение. Данная статья является продолжением исследований, начатых в работе [1], которая была посвящена нахождению параметрического представления области по облаку точек границы этой области, полученного каким-либо способом. Для решения задачи были использованы схемы подразделений [2, 3] и дискретное преобразование Фурье [4], с помощью которого методом наименьших квадратов (МНК) была найдена начальная последовательность схемы. Схемы подразделений появились в задачах геометрического моделирования, причём в последствии обнаружилась их тесная связь с дискретным вейвлет-преобразованием [4]. Так, например, схемы подразделений являются вейвлет-восстановлением с нулевыми вейвлет-коэффициентами, вейвлеты и масштабирующие функции можно получать посредством стационарных схем подразделений, в которых в качестве маски схемы выступает масштабная последовательность [4, 5]. Схема подъёма, использующая схемы подразделений, представленная в статье [6], позволяет строить биортогональные вейвлеты с заданными свойствами.

Следует отметить, что использование МНК в задаче, представленной в работе [1], затруднительно по двум причинам. Во-первых, сложно выписать матрицу системы линейных уравнений, и во-вторых, матрица имеет огромные размеры. Поэтому в работе [1] было использовано дискретное преобразование Фурье, которое решает сразу обе эти проблемы, но, к сожалению, применительно только к этой задаче. В том случае, если матрица схемы подразделений умножается на ещё какую-либо матрицу, (например, матрицу вейвлет-преобразования), то предложенный подход [1] уже не работает.

В связи с этим в данной статье рассматривается более общая задача, которую графически можно изобразить диаграммой, представленной на рис. 1, где A – некоторая матрица, z – заданная последовательность. Выделены последовательности, которые находятся при решении оптимизационной задачи. Отметим, что в работе [1] находилось только x_0, и матрица A была единичной.

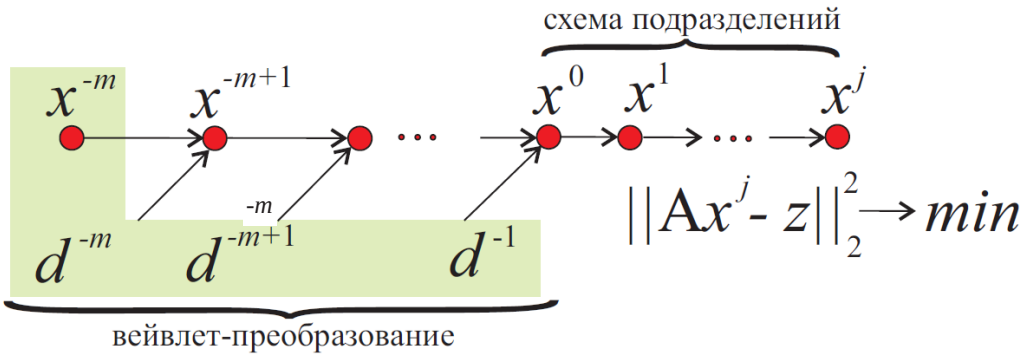


Рис. 1. Оптимизационная задача, рассматриваемая в статье. Выделены последовательности, которые определяются в ходе её решения

Для решения оптимизационной задачи в настоящей работе использованы два метода: линеаризованный алгоритм Брегмана и МНК, причём в обоих случаях все вычисления осуществлялись с использованием алгоритмов вейвлет-преобразований и схемы подразделений, без построения каких-либо матриц для этих алгоритмов, которые в рассматриваемых задачах имеют огромные размеры.

Все примеры, представленные в статье, получены с использованием языка программирования Python © и библиотек NumPy ©, PyTorch ©, Plotly ©, Matplotlib ©. Облака точек, полученных лазерным сканированием, взяты с сайта https://sites.cc.gatech.edu/projects/large models/.

1. Схемы подразделений и дискретные вейвлет-преобразования. В данном разделе приводятся основные результаты, касающиеся стационарных схем подразделений, и алгоритмы вейвлет-разложения и вейвлет-восстановления, которые будут использованы в дальнейшем.

Схема подразделений [2] определяется заданной последовательностью $a = \{a_\alpha\}_{\alpha\in\mathbf{Z}^s}, s \in \mathbf{N}$. Предполагаем, что $\operatorname{supp} a = \{\alpha: a_\alpha \neq 0\}$ – конечное множество. Обозначим $l_\infty(\mathbf{Z}^s)$ линейное нормированное пространство ограниченных последовательностей $\nu = \{\nu_\alpha\}_{\alpha\in\mathbf{Z}^s}$, в котором норма определяется равенством $\| \nu \|_\infty = \sup\limits_{\alpha\in\mathbf{Z}^s} |\nu_\alpha|$.

В дальнейшем под $\|\cdot\|_1, \|\cdot\|_2$ будем понимать нормы в пространствах $l_1(\mathbf{Z}^s)$ и $l_2(\mathbf{Z}^s)$. Введём в рассмотрение оператор $\mathrm{S}_a: l_\infty(\mathbf{Z}^s) \to l_\infty(\mathbf{Z}^s)$, который определим формулой

$$(\mathrm{S}_a\nu)_\alpha = \sum_{\beta\in\mathbf{Z}^s} a_{\alpha-2\beta}\,\nu_\beta,\ \nu \in l_\infty(\mathbf{Z}^s). \qquad (1)$$

Последовательность $\{a_\alpha\}_{\alpha\in\mathbf{Z}^s}$ будем называть маской, а S_a – оператором схемы подразделений.

Определение 1. [2] Будем считать, что схема подразделений

$$\nu^m = \mathrm{S}_a\nu^{m-1} = (\mathrm{S}_a)^m\nu,\ m = 1,2,\dots,\ \nu^0 = \nu$$

сходится в $l_\infty(\mathbf{Z}^s)$, если существует непрерывная функция $(\mathrm{S}_a^\infty\nu)$: $\mathbf{R}^s \to \mathbf{R}$ такая, что

$$\lim_{m\to+\infty} \left\| (\mathrm{S}_a^\infty\nu)\left(\frac{\cdot}{2^m}\right) - \nu^m \right\|_\infty = 0.$$

Если функция $(S_a^\infty \nu)$ удовлетворяет дополнительному свойству $(S_a^\infty \nu)(k) = \nu_k,\ k \in \mathbf{Z}^s$, то она называется интерполяционной.

Следует заметить, что для интерполяционной схемы должно быть выполнено условие [2] $a_{2k} = \delta_k$, где $\delta_k = 1$ при $k = 0$ и $\delta_k = 0$ в остальных случаях.

Пусть $\lambda = \{\lambda_k\}_{k\in\mathbf{Z}^s}$. Определим последовательности

$$(\uparrow \lambda)_n = \begin{cases} \lambda_k, & n = 2k,\ k \in \mathbf{Z}^s; \\ 0. & n \neq 2k.\ k \in \mathbf{Z}^s. \end{cases} \quad (\downarrow \lambda)_k = \lambda_{2k}, \quad k \in \mathbf{Z}^s.$$

Используя введённое обозначение, преобразование (1) можно записать в виде $S_a \nu = a * (\uparrow \nu)$, где символом «*» обозначена свёртка последовательностей.

Теорема 1 (Необходимое условие сходимости схемы подразделений [2]). Пусть $s = 1$. Предположим, что схема подразделений сходится для некоторого $\nu \in l_\infty(\mathbf{Z})$ и $(S_a^\infty \nu) \not\equiv 0$. Тогда маска удовлетворяет условию

$$\sum_{\beta\in\mathbf{Z}} a_{2\beta} = 1; \quad \sum_{\beta\in\mathbf{Z}} a_{2\beta+1} = 1.$$

Теорема 2. [2] Предположим, что схема подразделений сходится для всех $\nu \in l_\infty(\mathbf{Z}^s)$ и для некоторого $\nu \in l_\infty(\mathbf{Z}^s)$ функция $(S_a^\infty \nu) \not\equiv 0$. Тогда маска $\{a_\alpha\}_{\alpha\in\mathbf{Z}^s}$ определяет единственную непрерывную функцию с компактным носителем $\varphi = S_a^\infty \delta$, удовлетворяющую условиям:

$$\varphi(t) = \sum_{\alpha\in\mathbf{Z}^s} a_\alpha\, \varphi(2t - \alpha),\ t \in \mathbf{R}^s, \quad \sum_{\alpha\in\mathbf{Z}^s} \varphi\,(t - \alpha) = 1,\ \forall t \in \mathbf{R}^s.$$

Более того $(S_a^\infty \nu)(t) = \sum_{\alpha\in\mathbf{Z}^s} \nu_\alpha\, \varphi(t - \alpha),\ t \in \mathbf{R}^s$.

Пусть φ, $\tilde{\varphi}$ – две масштабирующие функции [4, 5] с масштабными последовательностями u, $\tilde{u}$, которые имеют конечные носители:

$$\varphi(t) = \sqrt{2}\sum_{k\in\mathbf{Z}} u_k\, \varphi(2t - k), \quad \tilde{\varphi}(t) = \sqrt{2}\sum_{k\in\mathbf{Z}} \tilde{u}_k\, \tilde{\varphi}(2t - k).$$

Будем рассматривать последовательности с действительными членами $u_k, \tilde{u}_k \in \mathbf{R}$. Обозначим $\varphi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}}\varphi\left(2^j x - k\right)$. Тогда, если ψ, $\tilde{\psi}$ – соответствующие вейвлеты, то

$$\psi = \sum_{k\in\mathbf{Z}} v_k\, \varphi_{1.k}, \quad \tilde{\psi} = \sum_{k\in\mathbf{Z}} \tilde{v}_k\, \tilde{\varphi}_{1,k}.$$

Известно [7], что, если имеет место равенство

$$F = \sum_{\lambda_1,\ldots,\lambda_s\in\mathbf{Z}} \left(c^j[1]\right)_{\lambda_1,\ldots,\lambda_S} \varphi_{j,\lambda_1} \otimes \ldots \otimes \varphi_{j,\lambda_s} = \sum_{k_1,\ldots,k_s\in\mathbf{Z}}$$
$$\left(c^{j-1}[1]\right)_{k_1,\ldots,k_S} \varphi_{j-1,k_1} \otimes \ldots \otimes \varphi_{j-1,k_S} +$$
$$+ \sum_{m_1,\ldots,m_s\in\mathbf{Z}} \left(c^{j-1}[2]\right)_{m_1,\ldots,m_S} \psi_{j-1,m_1} \otimes \varphi_{j-1,m_2} \otimes \ldots \otimes \varphi_{j-1,m_s} + \cdots +$$
$$+ \sum_{l_1,\ldots,l_s\in\mathbf{Z}} \left(c^{j-1}[2^s]\right)_{l_1,\ldots,l_s} \psi_{j-1,l_1} \otimes \ldots \otimes \psi_{j-1,l_s},$$

где $c^j[k]$ – некоторые последовательности, то справедливы следующие алгоритмы:

– алгоритм вейвлет-восстановления

$$(c^j[1])_{\lambda_1,\ldots,\lambda_s} = \sum_{k_1,\ldots,k_s\in\mathbf{Z}} (c^{j-1}[1])_{k_1,\ldots,k_s} \cdot (u \otimes \ldots \otimes u)_{\lambda_1-2k_1,\ldots\lambda_s-2k_s} +$$
$$+ \sum_{m_1,\ldots,m_s\in\mathbf{Z}} (c^{j-1}[2])_{m_1,\ldots,m_s} \cdot (v \otimes u \otimes \ldots \otimes u)_{\lambda_1-2m_1,\lambda_2-2m_2,\ldots,\lambda_s-2m_s} + \quad (2)$$
$$+ \sum_{l_1,\ldots,l_s\in\mathbf{Z}} (c^{j-1}[2^s])_{l_1,\ldots,l_s} \cdot (v \otimes v \otimes \ldots \otimes v)_{l_1-2m_1,l_2-2m_2,\ldots,l_s-2m_s}.$$

– алгоритм вейвлет-разложения

$$(c^{j-1}[1])_{k_1,\dots,k_S} = \sum_{\lambda_1,\dots,\lambda_s\in\mathbf{Z}} (c^j[1])_{\lambda_1,\dots,\lambda_s} (\tilde{u}\otimes\dots\otimes\tilde{u})_{\lambda_1-2k_1,\dots,\lambda_s-2k_s};$$

$$(c^{j-1}[2])_{k_1,\dots,k_S} = \sum_{\lambda_1,\dots,\lambda_s\in\mathbf{Z}} (c^j[1])_{\lambda_1,\dots,\lambda_s} (\tilde{v}\otimes\tilde{u}\otimes\dots\otimes\tilde{u})_{\lambda_1-2k_1,\lambda_2-2k_2,\dots,\lambda_s-2k_s};\dots \quad (3)$$

$$(c^{j-1}[2^s])_{k_1,\dots,k_S} = \sum_{\lambda_1,\dots,\lambda_s\in\mathbf{Z}} (c^j[1])_{\lambda_1,\dots,\lambda_s} (\tilde{v}\otimes\tilde{v}\otimes\dots\otimes\tilde{v})_{\lambda_1-2k_1,\lambda_2-2k_2,\dots,\lambda_s-2k_s}.$$

Следует отметить, что формулах (2) и (3) можно поменять местами фильтры $u, \tilde{u}$ и $v, \tilde{v}$. Фильтры разложения и восстановления обозначим соответственно $\tilde{h}[k]$, $h[k]$, $k = 1,2,\dots,2^s$. Используя введённое обозначение, преобразования (2) и (3) можно записать в виде

$$c^j[1] = \sum_{\alpha=1}^{2^s} h[\alpha] * \left(\uparrow c^{j-1}[\alpha]\right),\ \ c^{j-1}[k] = \downarrow \left(c^j[1] * \tilde{h}[k]^-\right),\ \ k = 1,2,\dots,2^s, \quad (4)$$

где $\left(\tilde{h}[k]^-\right)_\alpha = \tilde{h}[k]_{-\alpha},\ \ \alpha\in\mathbf{Z}^s$.

В дальнейшем будем рассматривать периодические последовательности $c^j[k]$ и фильтры $\tilde{h}, h$ с конечными носителями. В этом случае последовательности $c^{j-1}[k]$ также будут периодическими.

2. О матрицах схем подразделений. Рассмотрим схему подразделений $x^\lambda = a * \left(\uparrow x^{\lambda-1}\right)$, $\lambda = 1,2,\dots,j$, где $a = \{a_k\}_{k\in\mathbf{Z}}$ – маска схемы подразделений и $x^0 = \{x_\alpha^0\}_{\alpha\in\mathbf{Z}}$ – периодическая последовательность $x_{\alpha+n}^0 = x_\alpha^0,\ \forall\alpha\in\mathbf{Z}, n\in\mathbf{N}$. Ясно, что x^λ будет периодической с периодом $n_\lambda = 2^\lambda n$. На периоде указанное преобразование можно записать в матричном виде $x^\lambda = \mathrm{A}_\lambda\cdot x^{\lambda-1}$. Найдём A_λ и A_λ^T. Заметим, что преобразование $y^\lambda = \uparrow x^{\lambda-1}$ в матричном виде запишется следующим образом

$$\begin{pmatrix} \dots \\ y_{2\alpha-2}^\lambda \\ y_{2\alpha-1}^\lambda \\ y_{2\alpha}^\lambda \\ y_{2\alpha+1}^\lambda \\ y_{2\alpha+2}^\lambda \\ \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dots \\ 0\dots100\dots0 \\ 0\dots000\dots0 \\ 0\dots010\dots0 \\ 0\dots000\dots0 \\ 0\dots001\dots0 \\ \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dots \\ x_{\alpha-1}^{\lambda-1} \\ x_\alpha^{\lambda-1} \\ x_{\alpha+1}^{\lambda-1} \\ \dots \end{pmatrix}.$$

Матрицу этого преобразования обозначим $\uparrow^\lambda$. Тогда $y^\lambda = \uparrow^\lambda\cdot x^{\lambda-1}$. Найдём последовательность $\left(\uparrow^\lambda\right)^T\cdot y^\lambda$. Имеем

$$\begin{pmatrix} \dots \\ 0\dots0100000\dots0 \\ 0\dots0001000\dots0 \\ 0\dots0000010\dots0 \\ \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dots \\ y_{2\alpha-1}^\lambda \\ y_{2\alpha}^\lambda \\ y_{2\alpha+1}^\lambda \\ \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dots \\ y_{2\alpha-2}^\lambda \\ y_{2\alpha}^\lambda \\ y_{2\alpha+2}^\lambda \\ \dots \end{pmatrix}.$$

Таким образом $\left(\uparrow^\lambda\right)^T = \downarrow^\lambda$, где $\downarrow^\lambda$ – матрица, соответствующая преобразованию $z^\lambda = \downarrow y^\lambda$.

Далее рассмотрим преобразование $z^\lambda = a * y^\lambda$ в предположении, что y^λ – периодическая последовательность с периодом n_λ и $\operatorname{supp} a \subset [0; n_\lambda - 1]$. В этом случае z^λ будет периодической с периодом n_λ. На периоде указанное преобразование можно записать в матричном виде

$$\begin{cases} z_0^\lambda = a_0 y_0^\lambda + a_1 y_{n_\lambda-1}^\lambda + \cdots + a_{n_\lambda-1} y_1^\lambda; \\ z_1^\lambda = a_0 y_1^\lambda + a_1 y_0^\lambda + a_2 y_{n_\lambda-1}^\lambda + \cdots + a_{n_\lambda-1} y_2^\lambda; \\ z_2^\lambda = a_0 y_2^\lambda + a_1 y_1^\lambda + a_2 y_0^\lambda + a_3 y_{n_\lambda-1}^\lambda + \cdots + a_{n_\lambda-1} y_3^\lambda; \\ \ldots \\ z_{n_\lambda-1}^\lambda = a_0 y_{n_\lambda-1}^\lambda + a_1 y_{n_\lambda-2}^\lambda + \cdots + a_{n_\lambda-1} y_0^\lambda \end{cases}$$

Обозначим $[a]^\lambda$ матрицу полученной системы

$$[a]^\lambda = \begin{pmatrix} a_0 & a_{n_\lambda-1} & a_{n_\lambda-2} & a_{n_\lambda-3} & \ldots & a_1 \\ a_1 & a_0 & a_{n_\lambda-1} & a_{n_\lambda-2} & \ldots & a_2 \\ a_2 & a_1 & a_0 & a_{n_\lambda-1} & \ldots & a_3 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{n_\lambda-1} & a_{n_\lambda-2} & a_{n_\lambda-3} & a_{n_\lambda-4} & \ldots & a_0 \end{pmatrix}.$$

Отсюда $\left([a]^\lambda\right)^T = [a^-]^\lambda$, где $a_k^- = a_{n_\lambda-k}$. Итак, $\mathrm{A}_\lambda = [a]^\lambda \cdot \uparrow^\lambda$. Следовательно, $\mathrm{A}_\lambda^T = \downarrow^j \cdot [a^-]^\lambda$ или, если $z^{\lambda-1} = \mathrm{A}_\lambda^T \cdot y^\lambda$, то

$$z^{\lambda-1} = \downarrow \left(a^- * y^\lambda\right).$$

Рассмотрим преобразование (4). Пусть W_λ – матрица вейвлет-восстановления $c^\lambda[1] = \sum_{\alpha=1}^{2^s} h\,[\alpha] * \left(\uparrow c^{\lambda-1}[\alpha]\right)$. Тогда по (4) и вышеприведённому получаем, что W_λ^T соответствует преобразованию $\tilde{c}^{\lambda-1}[k] = \downarrow \left(c^\lambda[1] * h[k]^-\right)$, $k = 1,2,\ldots,2^s$, т.е. транспонированная матрица W_λ^T соответствует вейвлет-разложению с фильтрами $h[k]$.

3. Постановка задачи и алгоритмы решения. Пусть задана некоторая периодическая последовательность $z = \{z_\alpha\}_{\alpha \in \mathbf{Z}^s}$, $s \in \mathbf{N}$. Обозначим через $\mathrm{A}_{0,j}$ матрицу преобразования $x^\lambda[1] = a * \left(\uparrow x^{\lambda-1}[1]\right)$, $\lambda = 1,2,\ldots,j$, где $x^0[1]$ – периодическая последовательность. Пусть $\mathrm{W}_{-m,0}$, $m \in \mathbf{N}$ – матрица дискретного вейвлет-преобразования $x^\lambda[1] = \sum_{\alpha=1}^{2^s} h\,[\alpha] * \left(\uparrow x^{\lambda-1}[\alpha]\right)$, $\lambda = -m+1, \ldots, 0$. В этом разделе последовательности

$$d = \{x^{-m}[\alpha]\}_{\alpha=1}^{2^s} \cup \{x^{-m+1}[\alpha]\}_{\alpha=2}^{2^s} \cup \ldots \cup \{x^{-1}[\alpha]\}_{\alpha=2}^{2^s}$$

будем представлять в виде одного вектор-столбца, для определения которого рассмотрим следующие оптимизационные задачи:

$$d^* = \operatorname*{argmin}_d \left(\mu \parallel d \parallel_1 + \frac{1}{2} \parallel \mathrm{A} \cdot \mathrm{A}_{0,j} \cdot \mathrm{W}_{-m,0} d - z \parallel_2^2\right), \quad (5)$$

$$d^* = \operatorname*{argmin}_d \left(\frac{1}{2} \parallel \mathrm{A} \cdot \mathrm{A}_{0,j} \cdot \mathrm{W}_{-m,0} d - z \parallel_2^2\right), \quad (6)$$

где A – некоторая известная матрица, $\mu > 0$.

Для решения задачи (5) будем использовать линеаризованный алгоритм Брегмана, а для решения задачи (6) – МНК.

Линеаризованный алгоритм Брегмана подробно, с условиями сходимости изложен, например, в монографии [8]. Определим функцию

$$\mathcal{T}_\mu(y) = \begin{cases} y - \mu, & y \in (\mu; +\infty); \\ 0, & y \in [-\mu; \mu]; \\ y + \mu, & y \in (-\infty; -\mu). \end{cases}$$

Если μ, y – это векторы, то будем считать, что $\mathcal{T}_\mu(y) = (\mathcal{T}_{\mu_1}(y_1) \quad \dots \quad \mathcal{T}_{\mu_n}(y_n))$. Пусть $\mathrm{B} = \mathrm{A} \cdot \mathrm{A}_{0,j} \cdot \mathrm{W}_{-m,0}$.

Линеаризованный алгоритм Брегмана. Дано: $\eta \in (0; 1)$, $\mu > 0$, последовательность z.

1. $d^0 = 0$, $v^0 = 0$;

Для $k = 0,1, \dots$ находим

2. $v^{k+1} = v^k + \mathrm{B}^T(z - \mathrm{B}d^k)$;
3. $d^{k+1} = \eta \cdot \mathcal{T}_\mu(v^k)$.
4. $k = k + 1$.

Рассмотрим задачу (6). По МНК $d = (\mathrm{B}^T\mathrm{B})^{-1}\mathrm{B}^T z$. Чтобы не искать обратную матрицу, рассмотрим систему линейных уравнений с симметрической матрицей $\mathrm{B}^T\mathrm{B}d = \mathrm{B}^T z$. Пусть $\mathrm{C} = \mathrm{B}^T\mathrm{B}$ и $b = \mathrm{B}^T z$. Решение этой системы сведём к минимизации [9] функции $\varphi(x) = \frac{1}{2} d^T \mathrm{C} d - d^T b$. Минимизировать функцию $\varphi(x)$ будем градиентным спуском [9].

Алгоритм решения задачи (6).

1. $k = 0$, $d^0 = 0$, $r_0 = b$
2. Пока $|r_k| > \varepsilon$:

2.1. $k = k + 1$

2.2. $\alpha_k = \frac{r_{k-1}^T r_{k-1}}{r_{k-1}^T \mathrm{C} r_{k-1}}$

2.3. $d^k = d^{k-1} + \alpha_k r_{k-1}$

2.4. $r_k = b - \mathrm{C}d^k$.

Следует отметить, что в обоих алгоритмах не требуется знание матриц $\mathrm{A}_{0,j}, \mathrm{W}_{-m,0}$. Все вычисления, связанные с этими матрицами, осуществляются по формулам (1) и (4).

4. Вычислительный эксперимент. На рис. 2*а* представлена периодическая последовательность $z = \{z_\alpha\}_{\alpha \in \mathbf{Z}^2}$, значения которой на периоде равны всюду нулю, кроме светлой области, где они равны 1. Матрица A соответствует преобразованию, которое представляет собой поэлементное произведение последовательности на периодическую последовательность, представленную на рис. 2*б*, где темной части соответствует значение 0. Нужно отметить, что в векторно-матричной записи такому преобразованию соответствует диагональная матрица, на диагонали которой перечислены члены указанной последовательности. Таким образом, $\mathrm{A} = \mathrm{A}^T$. На рис. 2*в* показана последовательность $x^1[1]$ после 50 итераций градиентного спуска. Наконец на рис. 2*г* представлена последовательность

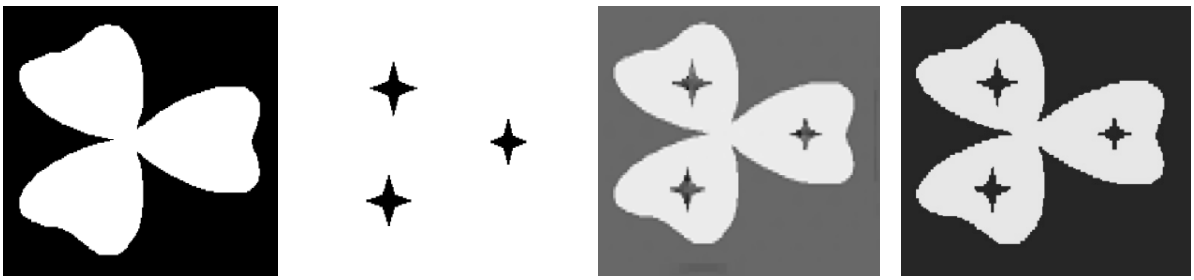
$$\left(x_\theta^1[1]\right)_\alpha = \begin{cases} 1, & (x^1[1])_\alpha > \theta; \\ 0, & (x^1[1])_\alpha \le \theta \end{cases}$$

для $\theta = 0{,}5$.

Фильтры, используемые в этом примере, имели вид:

$$u = (0,0,0,0.636396,0.777817,0.070710678,-0.07071067811865475),$$
$$\tilde{u} = (0,0,0,0.70710678,0.70710678,0,0),$$
$$v = (0,0,0,-0.70710678,0.70710678,0,0),$$
$$\tilde{v} = (0,0.070710678,0.070710678,-0.777817459,0.636396,0,0).$$

Маска схемы подразделений была выбрана равной $a = (0.5,\ 1,\ 0.5)$.



а ***б*** ***в*** ***г***

Рис. 2. Периодические последовательности: а – последовательность z; б – диагональные элементы матрицы **A;** ***в – последовательность*** $\boldsymbol{x^1[1]}$, ***полученная МНК с*** **m = 2, j = 1,** ***количество итераций*** **50;** ***г – последовательность*** $\boldsymbol{x_\theta^1[1]}$, $\boldsymbol{\theta = 0.4}$

Во втором примере рассмотрим задачу геометрического моделирования области по облаку точек её границы. Пусть задано множество точек $P = \{p_i\}_{i=1}^N \subset \mathbf{Z}^s,\ s = 2,3$, принадлежащих границе некоторой ограниченной области в $\mathbf{R}^s$. Будем рассматривать задачу нахождения гладкой функции $u(t),\ t \in \mathbf{R}^s$ такой, что неравенство $u(t) \geq \eta,\ \eta \in (0;1)$, определяет область, граница которой в некотором смысле близка к поверхности, содержащей заданное множество точек P. Обозначим 1_P – характеристическую функцию множества P. Для $\varepsilon \geq 1$ определим последовательность [1]

$$f_l^\varepsilon = \min\left(\left(1_{U_\varepsilon(0)} * 1_P\right)_l, 1\right),\ \ l \in \mathbf{Z}^s, \qquad (7)$$

где $U_\varepsilon(0) = \{l \in \mathbf{Z}^s:\ \| l \| < \varepsilon\}$.

Если f^ε задаёт границу замкнутой области D, то для получения характеристической функции 1_D этой замкнутой области в статье использовался морфологический алгоритм заполнения области. Обозначим $z_k = 1_D(k),\ k \in \mathbf{Z}^s$. Будем искать гладкую аппроксимацию $u(t) = \sum_{\alpha \in \mathbf{Z}^s} x^0\,[1]_\alpha \cdot (\varphi \otimes \ldots \otimes \varphi)(t - \alpha),\ t \in \mathbf{R}^s$ характеристической функции 1_D используя задачи (5) и (6). Здесь φ определяется маской схемы подразделений (см. теорему 2).

Результаты применения алгоритма Брегмана и МНК к облаку точек, полученному лазерным сканированием, представлены на рис. 3 и 4.

Следует заметить, что МНК, реализованный через градиентный спуск, дал удовлетворительный результат за меньшее число итераций. Фильтры, используемые в двух последних примерах, имели вид:

$$u = (0,0,0.353553,0.707107,0.353553,0,0),$$
$$\tilde{u} = (0,-0.17678,0.353553,1.06066,0.353553,-0.17678,0),$$
$$v = (0,0,-0.17678,-0.353553,1.06066,-0.353553,-0.17678),$$

$\tilde{v} = (0{,}0{,}0, -0.353553{,}0.707107, -0.353553{,}0).$

Маска схемы подразделений была выбрана равной u.

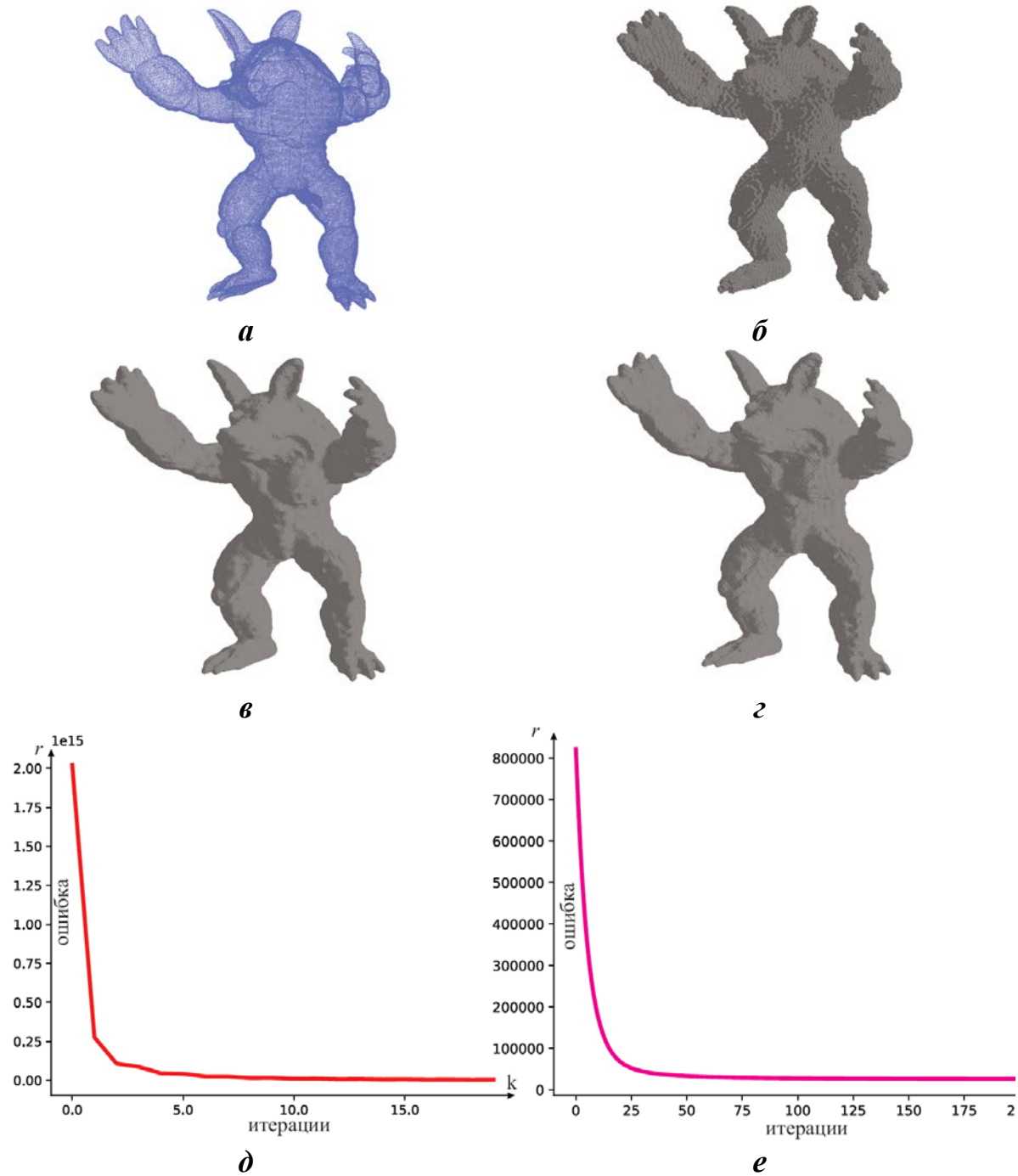
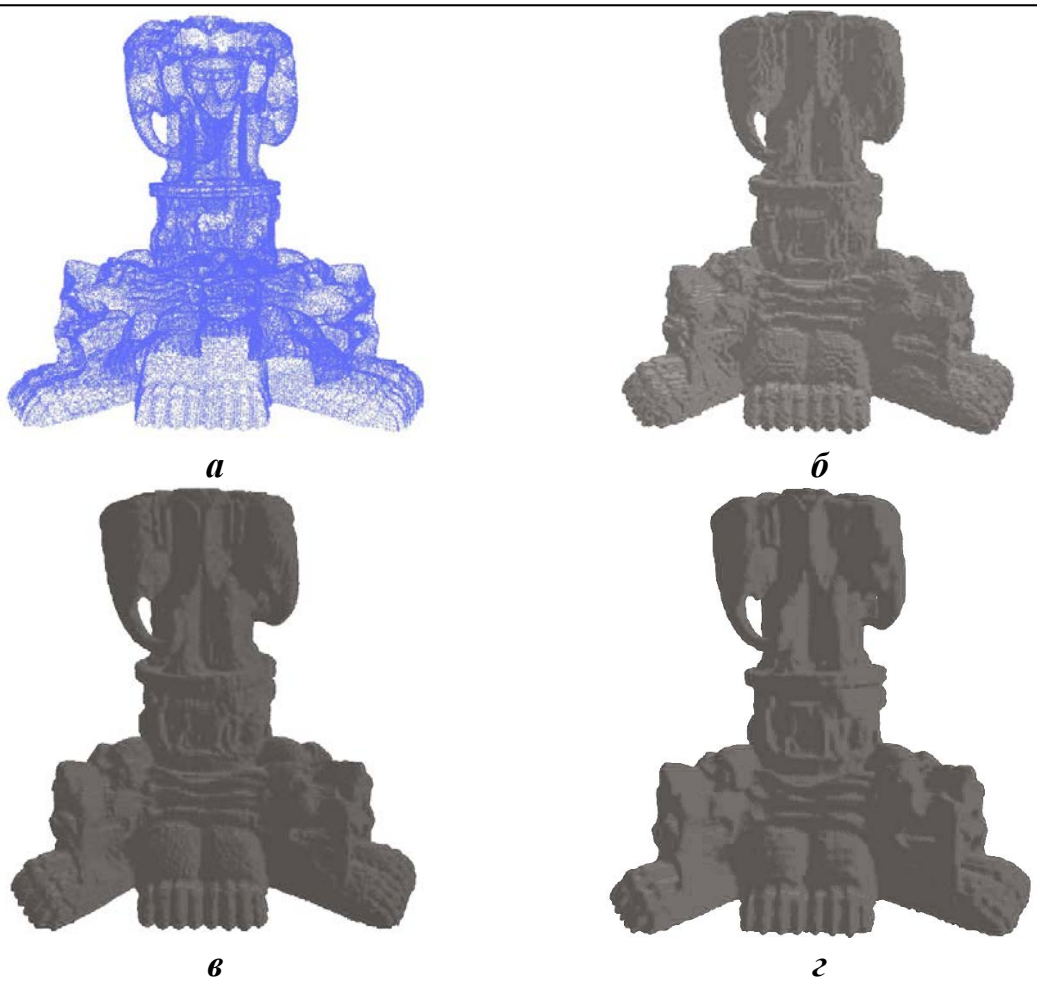


Рис. 3. Результаты применения алгоритма Брегмана и МНК к облаку точек: а – заданное облако точек; б – характеристическая функция $\mathbf{1_D}$***; в – последовательность*** $\boldsymbol{x^2[1]}$***, полученная МНК с*** $\boldsymbol{m = 2, j = 2}$***, количество итераций*** **20**; ***г – последовательность*** $\boldsymbol{x^2[1]}$***, полученная по алгоритму Брегмана с*** $\boldsymbol{\eta = 0.1, \mu = 1}$***, количество итераций*** **200**; ***д, е – зависимость погрешности*** $\frac{1}{2}\left\|\mathbf{A}_{0,2} \cdot \mathbf{W}_{-2,0}\boldsymbol{d} - \boldsymbol{z}\right\|_2^2$ ***от количества итераций в МНК и в алгоритме Брегмана соответственно***



а ***б*** ***в*** ***г***

Рис. 4. Результаты применения алгоритма Брегмана и МНК к облаку точек, полученному лазерным сканированием: а – заданное облако точек; б – характеристическая функция $\mathbf{1_D}$***; в – последовательность*** $x^1[1]$***, полученная МНК с*** $m = 2, j = 1$***, количество итераций*** **20;** ***г – последовательность*** $x^2[1]$***, полученная МНК с*** $m = 2, j = 2$***, количество итераций*** **20**

Заключение. В статье рассмотрено применение схем подразделений и вейвлетов в задачах геометрического моделирования. Представлены два алгоритма нахождения вейвлет-коэффициентов разложения начальной последовательности схемы подразделений и дано их сравнение. Важным практическим достоинством алгоритмов является отсутствие необходимости построения используемых в них матриц.

Список литературы

1. Битюков Ю.И., Битюков П.Ю. Об использовании дискретного преобразования Фурье в схемах подразделений // Моделирование и анализ данных, 2024. Том 14. №4. С. 30–44.

2. Cavaretta A.S. Stationary Subdivision Schemes / A.S. Cavaretta, W. Dahmen, C.A. Micchelli // Publication: Memoirs of the American Mathematical Society. 1991. V. 93. N 453. P. 1–186.

3. Dyn N. Analysis of Convergence and Smoothness by the Formalism of Laurent Polynomials // Tutorials on Multiresolution in Geometric Modelling. 2002. P. 51–68.

4. Frazier, Michael W. An Introduction to Wavelets through Linear Algebra. Springer, 1999. 503 p.

5. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. Москва: 2004. 280 с.

6. Sweldens W. The Lifting Scheme: A Custom-Design Construction of Biorthogonal Wavelets // Applied and Computational Harmonic Analysis. 1996. Vol. 3, Issue 2. P. 186–200.

7. Новиков И.Я., Протасов В.Ю., Скопина М.А. Теория всплесков. Москва: Физматлит, 2005. 612 с.

8. Dong Bin, Shen, Zuowei. MRA-Based Wavelet Frames and Applications. 10.1090/pcms/019/02.

9. Дж. Голуб, Ч. Ван Лоун. Матричные вычисления. Москва: Мир, 1999. 548 с.

Битюков Юрий Иванович, д-р техн. наук, доцент, профессор, yib72@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Денискин Юрий Иванович, д-р техн. наук, профессор, yurideniskin@gmail.com, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Битюков Павел Юрьевич, магистрант, p.bityukoff@yandex.ru, Россия, Москва, Московский энергетический институт (национальный исследовательский университет)

ON THE USE OF THE BREGMAN ALGORITHM AND LEAST SQUARES METHOD IN SUBDIVISION SCHEMES

Y.I. Bityukov, Y.I. Deniskin, P.Y. Bityukov

The paper is devoted to the application of stationary subdivision schemes to geometric modeling problems. The wavelet decomposition coefficients of the initial sequence of the subdivision scheme are obtained from the optimization problem by applying the Bregman algorithm and the least squares method. A comparison of these algorithms is given.

Key words: CAD, Subdivision Scheme, Wavelet, Geometric Modeling, Image Processingю

Bityukov Yury Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, yib72@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Deniskin Yury Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, yurideniskin@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Bityukov Pavel Yur'evich, postgraduate, p.bityukoff@yandex.ru, Russia, Moscow, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

УДК 004.032.26
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-285-286

ФЕДЕРАТИВНАЯ ГРАФОВАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СЕТЕВЫХ АНОМАЛИЙ С СОХРАНЕНИЕМ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ

Е.В. Ляпунцова, А.А.С. Арм

Растущая сложность киберугроз требует создания передовых систем обнаружения вторжений, способных точно выявлять аномалии в сетевом трафике, сохраняя при этом конфиденциальность данных. Традиционные решения систем обнаружения вторжений основаны на централизованной обработке данных, что создает значительные риски для конфиденциальности. Федеративное обучение предлагает децентрализованную альтернативу, но не может уловить сложные сетевые взаимосвязи. Для решения этой проблемы мы предлагаем Федеративную графовую нейронную сеть модель обнаружения аномалий с сохранением конфиденциальности, – которая объединяет графовые нейронные сети с Федеративное обучение. Представляя сетевой трафик в виде графа, Федеративная графовая нейронная сеть эффективно моделирует взаимодействие между сетевыми объектами, повышая точность обнаружения. Мы оцениваем Федеративная графовая нейронная сеть на наборах данных CICIDS2017 и UNSW-NB15, сравнивая ее с Федеративным усреднением (ФедУсред), Федеративной оптимизацией (ФедОпт) и централизованной моделью ГНС. Наши результаты показывают, что Федеративная графовая нейронная сеть достигает точности – 92%, F1-счета – 0,91 и Области под кривой рабочих характеристик приемника (AUC-ROC) – 0,95, превосходя существующие методы на основе Федеративное обучение, при сохранении почти централизованной производительности. Эти результаты подчеркивают, что Федеративная графовая нейронная сеть является перспективным решением для обнаружения вторжений в современных сетях с сохранением конфиденциальности.

Ключевые слова: Федеративное обучение (ФО), графовые нейронные сети (ГНС), система обнаружения вторжений (СОВ), обнаружение сетевых аномалий, машинное обучение с сохранением конфиденциальности.

Введение. Растущая зависимость от цифровых сетей привела к всплеску изощренных киберугроз, включая распределенные атаки, типа «отказ в обслуживании» (DDoS), программы-вымогатели и современные постоянные угрозы, которые представляют значительный риск для организаций и частных лиц [1]. Традиционные системы обнаружения вторжений систем обнаружения вторжений (*СОВ*) служат важнейшим механизмом защиты, обнаруживая аномальное поведение сети, свидетельствующее о киберугрозах. Однако традиционные решения *СОВ* в основном основаны на централизованном сборе и обработке данных, что создает ряд проблем, включая риск нарушения конфиденциальности, большие вычислительные затраты и ограниченную масштабируемость [2].

Чтобы смягчить эти ограничения, в качестве перспективной альтернативы, сохраняющей конфиденциальность, появилось федеративное обучение (ФО). ФО позволяет нескольким субъектам совместно обучать глобальную модель, сохраняя при этом локальность исходных данных, что снижает риски для конфиденциальности и уменьшает проблемы с соблюдением

нормативных требований [3]. Этот децентрализованный подход получил распространение в приложениях кибербезопасности, в частности в обнаружении сетевых аномалий, поскольку он позволяет *СОВ* использовать информацию из различных сетевых сред, не раскрывая конфиденциальные данные сетевого трафика.

Несмотря на свои преимущества, существующие модели *СОВ* на основе ФО такие, как Федеративным (ФедУсред) [3] и ФедОпт [4], имеют заметные недостатки. Эти модели рассматривают сетевой трафик как независимые и идентично распределенные точки данных, игнорируя реляционную структуру, присущую сетевым коммуникациям. В реальности киберугрозы часто проявляются как сложные, скоординированные схемы атак, в которых участвует множество сетевых объектов, взаимодействующих во времени [5]. Например, при DDoS-атаке несколько взломанных узлов одновременно атакуют цель, формируя высокоструктурированную модель атаки, которую невозможно эффективно отразить с помощью традиционных моделей ФО.

Для устранения этих недостатков мы представляем ФЕДЕРАТИВНАЯ ГРАФОВАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ (Ф-ГНС) – новую систему обнаружения аномалий с сохранением конфиденциальности, – которая объединяет графовые нейронные сети (ГНС) с ФО. Представляя сетевой трафик в виде графа, Ф-ГНС улавливает сложные топологические отношения между сетевыми объектами, что приводит к более эффективному обнаружению вторжений при сохранении конфиденциальности данных.

Задачи исследования. Целью данного исследования является разработка усовершенствованной модели обнаружения вторжений с сохранением конфиденциальности путем интеграции графовых нейронных сетей (ГНС) с федеративным обучением (ФО). В частности, исследование преследует следующие цели:

- повысить точность обнаружения аномалий за счет использования графовых представлений сетевого трафика, эффективно моделируя взаимосвязи между узлами сети для выявления сложных моделей атак, которые традиционные модели на основе ФО упускают из виду.

- оценить производительность Ф-ГНС в сравнении с существующими методами *СОВ* на основе ФО такими, как ФедУсред и ФедОпт, а также с централизованной моделью ГНС, используя эталонные наборы данных реального мира.

- обеспечить масштабируемость и эффективность Ф-ГНС в распределенных сетевых средах, решая такие ключевые проблемы, как накладные расходы на связь, вычислительные ограничения и распределение данных, не являющихся ИД, в системах обнаружения вторжений на основе ФО.

Вклад. Данная работа вносит следующий вклад в область кибербезопасности с сохранением конфиденциальности и обнаружения вторжений:

-предлагается Ф-ГНС – новая федеративная модель обнаружения аномалий, – которая объединяет графовые нейронные сети (ГНС) с федеративным обучением (ФО), позволяя обнаруживать вторжения с сохранением конфиденциальности и эффективно передавать топологию сети.

-построение графовых представлений сетевого трафика, где узлы представляют IP-адреса, а ребра соответствуют сетевым потокам, позволяет модели изучать сложные модели атак, присущие сетевым коммуникациям.

-демонстрирует превосходство Ф-ГНС над существующими методами на основе ФО (ФедУсред и ФедОпт), [3] достигая практически централизованной точности при сохранении конфиденциальности данных.

-валидация Ф-ГНС на эталонных наборах данных (CICIDS2017 и UNSW-NB15), обеспечивающая эмпирическое подтверждение его эффективности в обнаружении киберугроз в реальных сетевых условиях.

Обнаружение вторжений на основе машинного обучения. Традиционные *СОВ* на основе машинного обучения используют для обнаружения аномалий деревья решений (ДР), случайные леса (СЛ) и машины опорных векторов (МОВ). Однако эти методы требуют тщательной разработки признаков и с трудом справляются с высокоразмерным сетевым трафиком [1]. *СОВ* на основе глубокого обучения такие, как автоэнкодеры и СНС, продемонстрировали более высокую производительность, но страдают от высоких вычислительных затрат и плохой интерпретируемости [6].

Федеративное обучение для кибербезопасности. ФО обеспечивает совместное обучение на нескольких устройствах с сохранением конфиденциальности данных [3]. Однако традиционные подходы к ФО такие, как ФедУсред и ФедОпт, не позволяют моделировать структурные зависимости в сетевом трафике [4]. Данное исследование расширяет возможности *СОВ* на основе ФО, внедряя обучение на основе графов для учета пространственных зависимостей между сетевыми объектами.

Графовые нейронные сети для обнаружения аномалий. Графовые нейронные сети такие, как графические сверточные сети (ГСС), сети внимания к графам (СВГ) и Выборку и агрегирование графиков (ВИАГ), отлично справляются с изучением взаимосвязей между объектами [7]. Они нашли применение в кибербезопасности, но существующие *СОВ* на основе ГНС требуют централизованного обучения, что ограничивает их практичность в реальных сценариях [8]. Наша работа объединяет ГНС и ФО для преодоления этих ограничений.

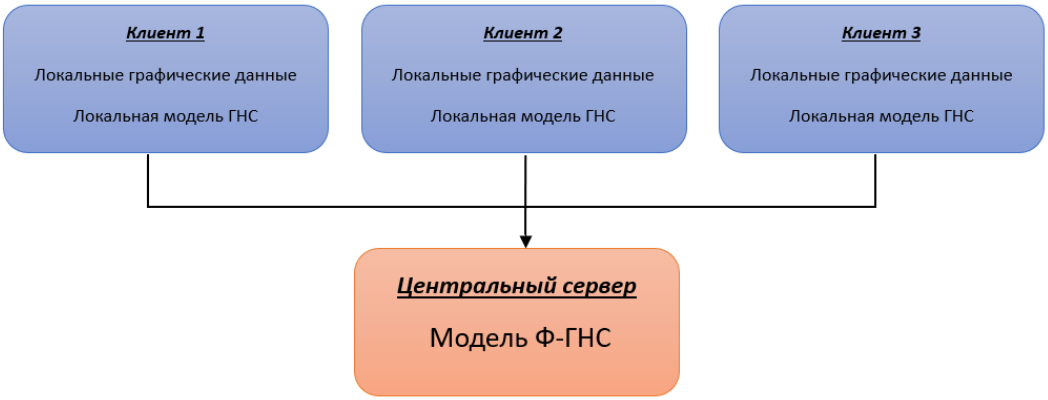


Диаграмма 1. совместный характер обучения Ф-ГНС в распределенной среде

Методология: Набор данных и предварительная обработка. Чтобы оценить эффективность нейронной сети (Ф-ГНС) в обнаружении сетевых аномалий, мы используем два широко известных набора данных для обнаружения вторжений:

-*CICIDS2017:* разработанный Канадским институтом кибербезопасности, этот набор данных содержит реальный, обычный и атакующий трафик, включая DDoS, грубую силу, проникновение, ботнет и веб-атаки [8].

-*UNSW-NB15:* созданный Австралийским центром кибербезопасности, этот набор данных включает девять типов сетевых вторжений таких, как бэкдоры, эксплойты, фаззеры, разведка и черви [9].

Инженерия признаков:

-числовые признаки: длительность потока, общее количество входящих пакетов, общее количество исходящих пакетов, количество отправленных байтов.

-категориальные признаки: протокол, тип атаки (кодируется с помощью кодировки меток

Графовое представление сетевого трафика. Традиционные системы обнаружения вторжений (*СОВ*) анализируют сетевой трафик как независимые записи, не позволяя уловить реляционные зависимости между сетевыми объектами [9]. Чтобы решить эту проблему, мы строим графовое представление сетевого трафика, где:

-узлы представляют собой уникальные IP-адреса, участвующие в сетевом взаимодействии.

-графы представляют сетевые потоки между IP-адресами, взвешенные по длительности потока.

Матрица смежности AAA сетевого графа определяется как:

$$A_{ij}=\begin{Bmatrix} Flow\ Duration\ ij, & if\ there\ is\ a\ connection\ between\ IPi\ and\ IPj \\ 0, & otherwise \end{Bmatrix}$$

Такое представление на основе графов позволяет Ф-ГНС использовать механизмы передачи сообщений в графовых нейронных сетях (ГНС), отражая сложные взаимодействия между узлами сети.

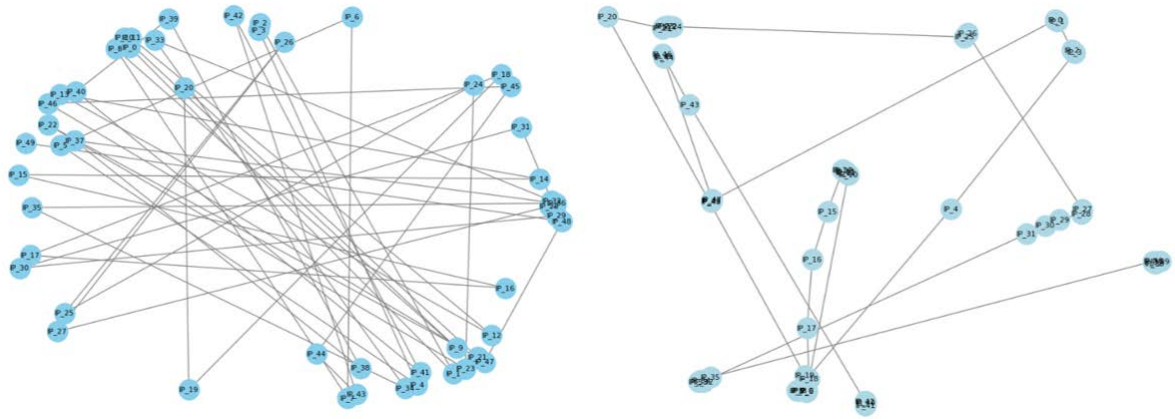


Рис. 1. Графическое представление сетевого трафика UNSW-NB15 и CICDs2017

Федеративная графовая нейронная сеть (Ф-ГНС). Модель графовой нейронной сети ,В качестве основы ГНС мы используем Выборку и агрегирование графиков (ВИАГ) [10] масштабируемый подход для обучения вкраплений узлов через агрегированные характеристики соседей. При задании узла v ВИАГ обновляет его вложение, агрегируя информацию от его соседей:

$$h_v^{(l+1)} = \sigma(W^{(1)} \cdot AGG(\{h_u^{(1)}, \forall u \in N(v)\})).$$

Объединенное обучение Ф-ГНС. Чтобы обеспечить децентрализованное обучение с сохранением конфиденциальности, мы распространяем принципы федеративного обучения на модели на основе графов. Каждый клиент обучает локальную модель ВИАГ на своих данных о трафике, структурированных графами, и делится с центральным сервером только обновлениями модели [11].

Алгоритм: Федеративное обучение Ф-ГНС
Входные данные: Локальные разделы набора данных, параметры глобальной модели θ
Выходные данные: Обновленная глобальная модель
1-Инициализация параметров модели ГНС θ
2-Для каждого раунда связи t:
a) ***Для каждого клиента i параллельно***:
- Постройте граф трафика локальной сети $G_i=(V_i,E_i)$

-вычислите вкрапления узлов ВИАГ
-обучите локальную ГНС с помощью оптимизатора Адама
b) ***Вычислите обновленную модель*** Δw_i

$$w_{t+1} = \sum_{i=1}^{K} \frac{ni}{N} w_t^i$$

3- ***Обновление глобальных параметров модели θ.***
4- Повторяйте до сходимости

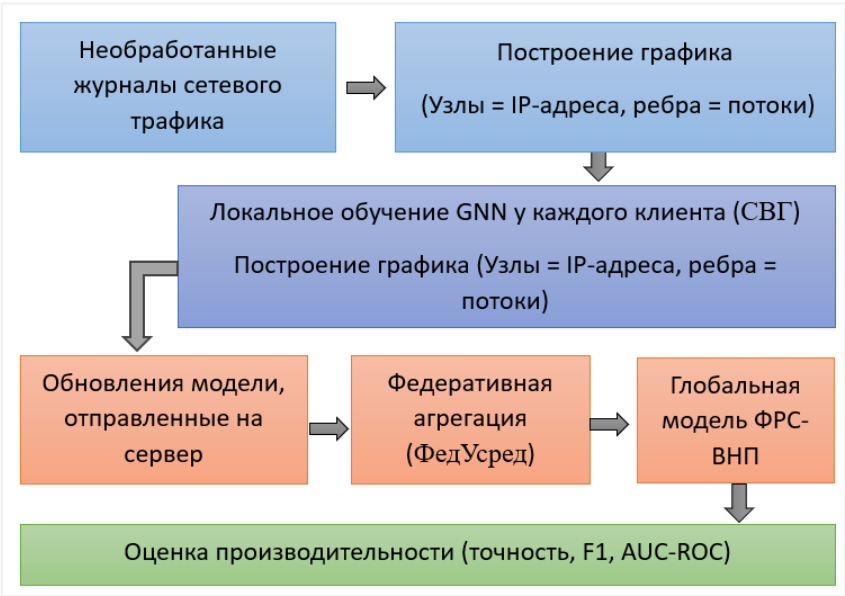


Диаграмма 2. Конвейерная блок-схема - целостный взгляд на методологию

Результаты экспериментов.

Сравнение производительности. Чтобы оценить эффективность Ф-ГНС, мы сравниваем его производительность с тремя базовыми моделями:

1.Централизованная ГНС: модель ВИАГ, обученная на всех данных в одном месте (идеальный вариант, но нереалистичный из-за соображений конфиденциальности).

2.ФедУсред: стандартный подход к федеративному обучению, который агрегирует обновления клиентов без учета структуры графа.

3.ФедОпт: метод ФО, который применяет проксимальный термин для смягчения неоднородности данных.

Метрики оценки. Для оценки эффективности модели мы используем стандартные метрики обнаружения вторжений:

- точность: измеряет общую корректность предсказаний.

-отзыв (коэффициент обнаружения): измеряет долю правильно обнаруженных атак среди всех реальных атак.

- *F1*-Счет: Среднее гармоническое значение показателей precision и recall.

- *AUC-ROC* (площадь под кривой операционной характеристики получателя): измеряет способность модели отличать атакующий трафик от нормального.

Таблица 1

Результаты метрик

Модели	***Точность***	***F1-Счет***	***AUC-ROC***
Централизованная ГНС	93.2%	0.92	0.96
ФедУсред	88.4%	0.86	0.89
ФедОпт	89.7%	0.88	0.91
Ф- ГНС (наша)	92.0%	0.91	0.95

Результаты показывают, что Ф-ГНС достигает практически централизованной производительности, значительно превосходя стандартные методы ФО (ФедУсред и ФедОпт). Представление на основе графов улучшает обнаружение аномалий за счет улавливания реляционных зависимостей в сетевом трафике.

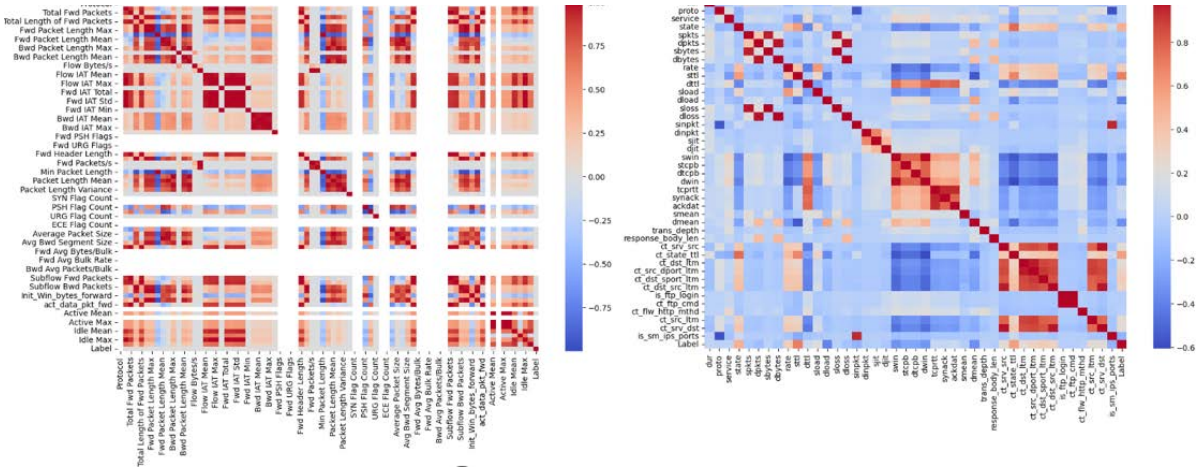


Рис. 2. Тепловая карта корреляции характеристик наборов данных CICID2017 и UNSW-NB15

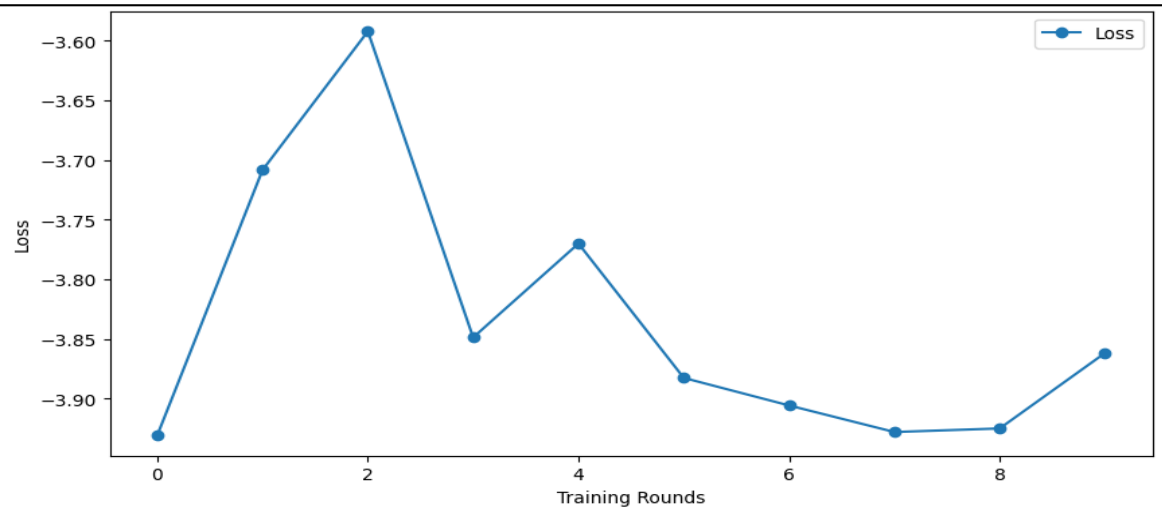


Рис. 3. Потери при федеративном обучении за раунд

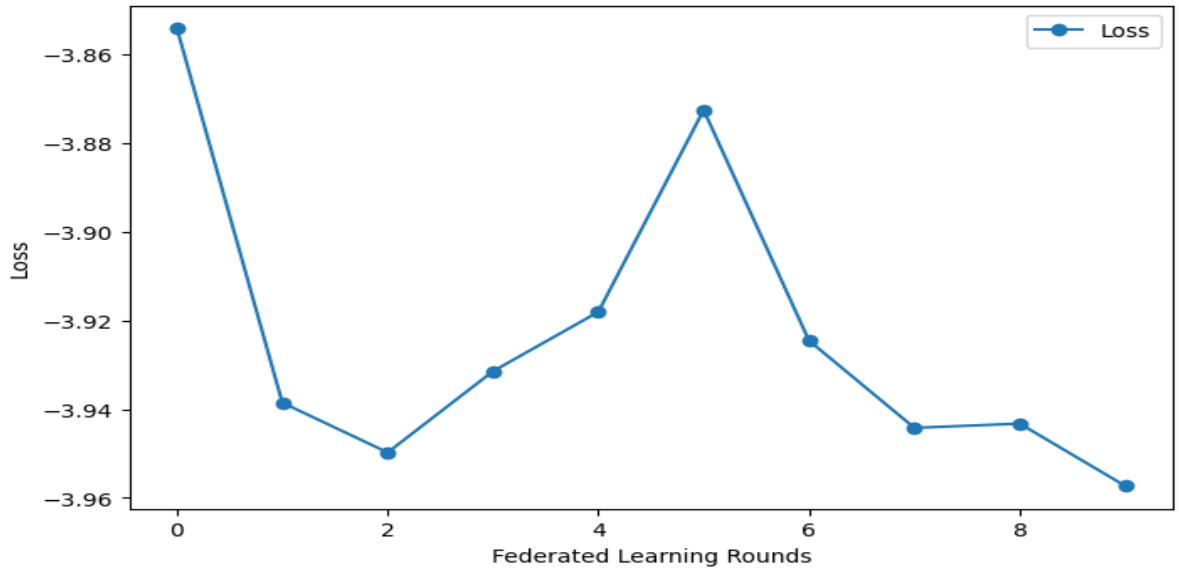


Рис. 4. Федеративное обучение - потери на обучение за раунд

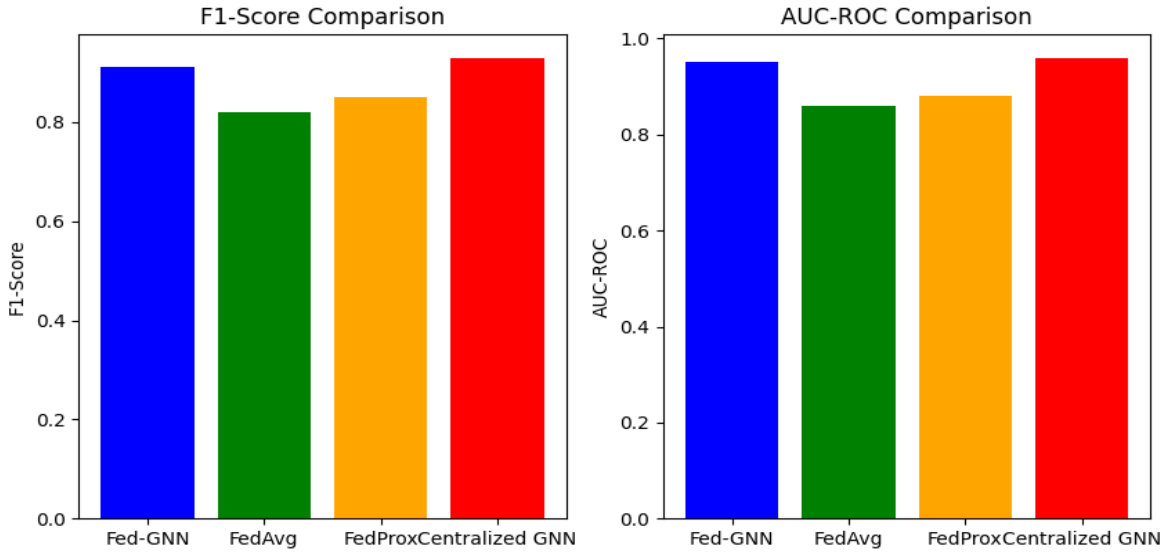


Рис. 5. Сравнение F1-Счет и AUC-ROC

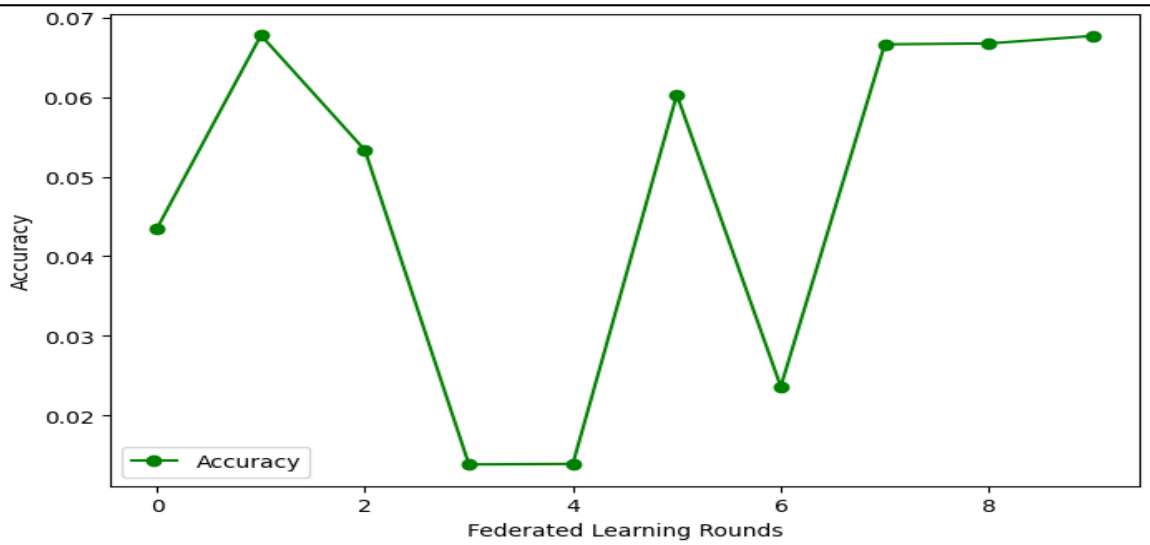


Рис. 6. Федеративное обучение - точность за раунд

Заключение. Ф-ГНС успешно объединяет графовые нейронные сети (ГНС) с федеративным обучением (ФО) для создания решения по обнаружению вторжений с сохранением конфиденциальности и высокой точностью. Используя представления на основе графов, она улавливает сложные взаимосвязи между сетевыми объектами, что значительно повышает эффективность обнаружения аномалий. Наша оценка показывает, что Ф-ГНС превосходит традиционные методы ФО такие, как ФедУсред и ФедОпт, достигая результатов, сравнимых с централизованной моделью ГНС, и обеспечивая при этом конфиденциальность данных.

Помимо высокой точности и конфиденциальности, Ф-ГНС отличается масштабируемостью, что делает ее хорошо подходящей для корпоративной безопасности, облачных инфраструктур и сетей IoT. Ее способность эффективно работать в распределенных средах решает ключевые проблемы современной кибербезопасности. Однако необходимы дальнейшие исследования, чтобы повысить интерпретируемость моделей с помощью объяснимого ИИ (XAI), оптимизировать производительность для IoT и пограничных устройств, а также интегрировать непрерывное обучение для адаптации к меняющимся киберугрозам. Эти будущие усовершенствования повысят адаптивность Ф- ГНС и обеспечат долгосрочную эффективность в реальных приложениях для обеспечения безопасности.

Преодолевая разрыв между сохранением конфиденциальности и высокопроизводительным обнаружением вторжений, Ф-ГНС знаменует собой значительный прогресс в области интеллектуальных решений для кибербезопасности.

Список литературы

1. M. A. Ferrag, L. Maglaras, H. Janicke, and R. Smith, "Deep Learning Techniques for Cyber Security Intrusion Detection : A Detailed Analysis," pp. 126-136, 2019, doi: 10.14236/ewic/icscsr19.16.

2 R. Sommer and V. Paxson, "Outside the Closed World: On Using Machine Learning for Network Intrusion Detection," in 2010 IEEE Symposium on Security and Privacy, 16-19 May 2010 2010, pp. 305-316, doi: 10.1109/SP.2010.25.

3. S. Mohammadi, A. Balador, S. Sinaei, and F. Flammini, "Balancing privacy and performance in federated learning: A systematic literature review on methods and metrics," Journal of Parallel and Distributed Computing, vol. 192, p. 104918, 2024/10/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2024.104918.

4. J. Zhou et al., "Graph neural networks: A review of methods and applications," AI Open, vol. 1, pp. 57-81, 2020/01/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.aiopen.2021.01.001.

5. T. Nandy, R. Md Noor, R. Kolandaisamy, M. Y. I. Idris, and S. Bhattacharyya, "A review of security attacks and intrusion detection in the vehicular networks," Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, vol. 36, no. 2, p. 101945, 2024/02/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.101945.

6. H. Liu and B. Lang, "Machine Learning and Deep Learning Methods for Intrusion Detection Systems: A Survey," Applied Sciences, vol. 9, no. 20, doi: 10.3390/app9204396.

7. A. G. Vrahatis, K. Lazaros, and S. Kotsiantis, "Graph Attention Networks: A Comprehensive Review of Methods and Applications," Future Internet, vol. 16, no. 9, doi: 10.3390/fi16090318.

8. I. Sharafaldin, A. Habibi Lashkari, and A. A. Ghorbani, "Toward Generating a New Intrusion Detection Dataset and Intrusion Traffic Characterization," in International Conference on Information Systems Security and Privacy, 2018.

9. N. Moustafa and J. Slay, "UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set)," in 2015 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS), 10-12 Nov. 2015 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/MilCIS.2015.7348942.

10. W. L. Hamilton, R. Ying, and J. Leskovec, "Inductive representation learning on large graphs," presented at the Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, Long Beach, California, USA, 2017.

11. R. Liu and H. Yu, "Federated Graph Neural Networks: Overview, Techniques and Challenges," ArXiv, vol. abs/2202.07256, 2022.

Ляпунцова Елена Вячеславовна, д-р техн. наук, профессор, lev77@me.com, Россия, Москва, Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",

Арм Ажи Азиз Салих, аспирант, arm.azhi@yandex.com, Россия, Москва, Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС"

FEDERATED GRAPH NEURAL NETWORK FOR PRIVACY-PRESERVING NETWORK ANOMALY DETECTION

E.V. Lyapuntsova, Arm Azhi Aziz Salih

As The increasing sophistication of cyber threats necessitates advanced Intrusion Detection Systems (IDS) that can accurately identify anomalies in network traffic while preserving data privacy. Traditional IDS solutions rely on centralized processing, posing significant privacy risks. Federated Learning (FL) offers a decentralized alternative but struggles to capture complex network relationships. To address this, we propose Federated Graph Neural Network (Fed-GNN), a privacy-preserving anomaly detection model that integrates Graph Neural Networks (GNNs) with FL. By representing network traffic as a graph, Fed-GNN effectively models interactions between network entities, improving detection accuracy. We evaluate Fed-GNN on CICIDS2017 and UNSW-NB15 datasets, comparing it to FedAvg, FedProx, and a centralized GNN model. Our results show that Fed-GNN achieves 92% accuracy, an F1-score of 0.91, and an AUC-ROC of 0.95, outperforming existing FL-based methods while maintaining near-centralized performance. These findings highlight Fed-GNN as a promising solution for privacy-preserving intrusion detection in modern networks.

Keywords: Federated learning (FO), graph neural networks (GNSS), intrusion detection system (SOV), network anomaly detection, machine learning with confidentiality.

Lyapuntsova Elena Vyacheslavovna, doctor of technical sciences, professor, lev86@bmstu.ru, Russia, Moscow, National Research University of Technology "MISIS",

Arm Azhi Aziz Salih, postgraduate, arm.azhi@yandex.com, Russia, Moscow, National University of Science and Technology "MISIS"

УДК 621.391.8
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-294-295

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ MESH-СЕТЕЙ

А.А. Перфильев, С.А. Лупин

В работе рассматриваются особенности проектирования mesh-сетей на основе протокола 802.11ac. Использование средств моделирования в процессе проектирования позволяет существенно сократить время разработки, повысить качество планирования беспроводных сетей и обосновать применение конкретных технических методов и средств. Использование инструментов моделирования позволяет найти оптимальное расположение точек доступа и их параметры, максимизировать зоны покрытия и уменьшить влияние интерференции на беспроводные каналы связи. Представлены результаты моделирования в среде Altair Feko, которые подтвердили возможность использования предлагаемого подхода на практике.

Ключевые слова: беспроводные каналы связи, mesh-сети, моделирование.

Введение. Беспроводные локальные сети (WLAN) предоставляют возможность создания гибких сетевых инфраструктур без необходимости использования физического подключения. Требования к современным беспроводным локальным сетям включают устойчивость и бесшовность связи для всех абонентов внутри зоны обслуживания. Зона обслуживания напрямую зависит от частоты сигнала и уровня мощности приёмо-передающих

устройств. Наиболее предпочтительными частотами для WLAN-систем являются частоты ISM-диапазона, поскольку его использование не требует лицензирования. Самый распространенный стандарт для WLAN определён в спецификациях IEEE 802.11 и называется Wi-Fi. Для устройств данных стандартов существуют ограничения на максимальную мощность излучения передатчика. Для диапазона частот 2400 – 2483,5 МГц максимальный уровень сигнала составляет 20 дБм, для диапазона частот 5150 – 5350 МГц максимальный уровень сигнала составляет 23 дБм [1]. Сигнал такой мощности от одной точки доступа имеет ограниченную зону покрытия, которой не всегда хватает при эксплуатации беспроводных сетей внутри больших зданий, что приводит к появлению некоторых особенностей при проектировании сетей передачи данных.

Особенности проектирования mesh-сетей. Одним из технических решений, которое обеспечивает стабильную и единую зону радиопокрытия, является использование технологии mesh-сетей. В Wi-Fi поддержка mesh-сетей появились в 2011 году (IEEE 802.11s) [2]. Этот стандарт описывает протоколы для формирования mesh-сетей и управления беспроводными точками доступа, позволяя последним взаимодействовать друг с другом при передаче данных и обеспечивать совместную маршрутизацию [3]. Взаимодействие между точками доступа осуществляется при помощи специально разработанного протокола маршрутизации «Hybrid Wireless Mesh Protocol» (HWMP) [4].

Mesh-сети при переключении между узлами одной сети не требуют активных действий со стороны клиентского устройства, поскольку информация, необходимая для подключения к Wi-Fi, единая для всех точек доступа [5].

Использование mesh-сети значительно увеличивает зону радиопокрытия единой сети и улучшает качество соединения из-за возможности выбора точки доступа с наибольшим сигналом в месте расположения абонентского устройства.

К недостаткам mesh-сетей можно отнести обязательное радиочастотное планирование беспроводной сети. Неправильно спроектированная mesh-сеть может привести к значительному ухудшению качества связи из-за явления интерференции. Причиной этого является увеличенное количество взаимодействий внутри сети, поскольку данные, полученные от абонентского устройства, передаются от точки доступа к другой точке и этот процесс повторяется до достижения выходного узла (Mesh Portal). Следовательно, транзакционные издержки на одного абонента значительно вырастают в зависимости от сложности сети. С учетом ограниченного количества частотных диапазонов абонентские устройства и точки доступа вынуждены конкурировать за радиочастотный канал.

Моделирование беспроводного канала позволит разнести в пространстве и по частотам точки доступа таким образом, чтобы минимизировать негативное влияние явления интерференции и создать максимально возможную зону покрытия mesh-сети.

В mesh-сети используют два типовых сценария:

– Связь между точкой доступа и абонентским устройством;

– Связь между абонентскими устройствами (узлами).

Современные Wi-Fi устройства поддерживают технологию Dual-Band, что позволит разнести по разным частотным диапазонам различные сценарии. Существуют 2 частотных диапазона: 2.4 ГГц и 5 ГГц. Использование частот 2.4 ГГц обеспечивает меньшую пропускную способность при увеличенной дальности связи, а диапазон 5 ГГц имеет более высокую скорость передачи данных, но меньший радиус действия.

Использование частоты 2.4 ГГц в силу размеров офиса (рисунок 1) является более предпочтительным для абонентских устройств, если не требуется высокая скорость канала передачи данных. Это связано с большим покрытием точки доступа, так как сигналы на этой частоте лучше проникают сквозь преграды, такие как стены и мебель. На данной частоте при минимальной ширине канала (20 МГц) присутствуют только 3 канала, которые не пересекаются.

При высоконагруженных сценариях использования беспроводной сети наибольшая нагрузка приходится на передачу данных между узлами. Таким образом, для связи между точками доступа рационально использовать диапазон 5 ГГц. Недостаток этого диапазона частот в виде уменьшенного радиуса действия и увеличенного затухания сигнала в физических препятствиях можно компенсировать, если устанавливать узлы связи в зоне прямой видимости друг друга. Такой подход снизит потери сигнала между узлами и уменьшит влияние интерференции. На частоте 5 ГГц количество непересекающихся каналов больше, чем на частоте 2.4 ГГц. К примеру, при полосе канала в 40 МГц, используя только диапазон частот 5150-5350 МГц, можно получить 4 непересекающихся канала.

Модель mesh-сети. Моделирование распространения сигнала реализовано в среде Altair Feko WinProp. В качестве метода моделирования был выбрана модель преобладающего пути [6]. Этот метод используется для определения основных путей распространения сигнала, по которым сигнал достигает приёмного устройства. В отличие от методов трассировки лучей, метод преобладающего пути игнорирует менее значимые пути распространения и требует значительно меньше вычислительных ресурсов, чем методы трассировки лучей. При этом он точнее, чем эмпирические методы, поскольку преобладающие лучи взаимодействуют с моделью среды распространения и учитывают влияние физических преград на распространение сигнала.

Диэлектрические свойства стройматериалов описываются в рекомендации МСЭ-R P.2040-3, модель дифракции основана на единой теории дифракции [7,8].

В качестве стандарта беспроводной связи был выбран стандарт 802.11ac, который поддерживает следующие типы модуляции сигнала:

– BSPK (1 бит, 2 состояния);

– QPSK (2 бита, 4 состояния);

– 16-QAM (4 бита, 16 состояний);
– 64-QAM (6 бит, 64 состояния);
– 256-QAM (8 бит, 256 состояний).

Использование квадратурной модуляции значительно увеличивает пропускную способность беспроводного канала связи из-за большего количества информации, передаваемого на 1 состояние. Недостатком квадратурной модуляции является повышенное требование к отношению сигнал/шум из-за уменьшения разницы по фазе и амплитуде между соседними состояниями созвездия. К примеру, для 256-QAM отношение сигнал/шум в точке приёма должно составлять минимум 30 дБ для обеспечения надежного соединения и приемлемого уровня битовых ошибок при воздействии на канал аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) [9]. С уменьшением порядка квадратурной модуляции требования к отношению сигнал/шум падают: для QPSK модуляции при аналогичных требованиях достаточно превышения уровня сигнала на 10 дБ. Наихудший сценарий, который учитывает влияние интерференции и многолучевого распространения (канал Релея) требует отношения сигнал/шум для каждого типа модуляции ещё выше [10].

Параметры модуляций для стандарта 802.11ac

Параметр	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
Требуемое отношение сигнал/шум	2	10 - 14	17 - 30	23 - 40	30 - 50
Скорость кодирования	1/2	1/2 - 3/4	1/2 - 3/4	2/3 - 5/6	3/4 - 5/6
Коэф. накладных расходов, 2.4 ГГц, %	10	10	10	10	10
Коэф. накладных расходов, 5 ГГц, %	20	20	20	20	20
Скорость 2.4 ГГц, Мбит/с	8	16 - 24	32 - 48	64 - 80	96 - 106
Скорость 5 ГГц, Мбит/с	11,4	22 - 34	45 - 68	91 - 114	136 - 152

В таблице приведены параметры для используемых типов модуляций. Значения параметров для АБГШ и канала Релея разделены символом «-». Количество избыточных бит при помехоустойчивом кодировании не зависит от типа используемой модуляции, но напрямую влияет на скорость передачи информации, поэтому скорость кодирования возрастает с ростом порядка квадратурной модуляции. Для канала связи между точками доступа коэффициент накладных расходов увеличен в 2 раза из-за использования дополнительных протоколов.

Тестовый пример. На рисунке 1 представлена 2D проекция этажа типового офисного здания.

Его размеры составляют 75 метров в длину, 30 метров в ширину и 2,8 метра в высоту. Внутренние перекрытия состоят из гипсокартона толщиной приблизительно 10 см, внешние стены выполнены из бетона толщиной 30 см, двери деревянные. Отдельно стоит отметить наличие опорных стен (розовый цвет), их параметры идентичны внешним стенам.

Результаты моделирования. На рисунке 2 изображен наихудший случай распространения при использовании одной несущей частоты. Точки доступа на рисунке обозначены Site 1, Site 2, Site 3, Site 4. Высота

расположения точек доступа составляет 2.5 метра. Уровень сигнала указан в 2D-проекции на высоте 1 метр.

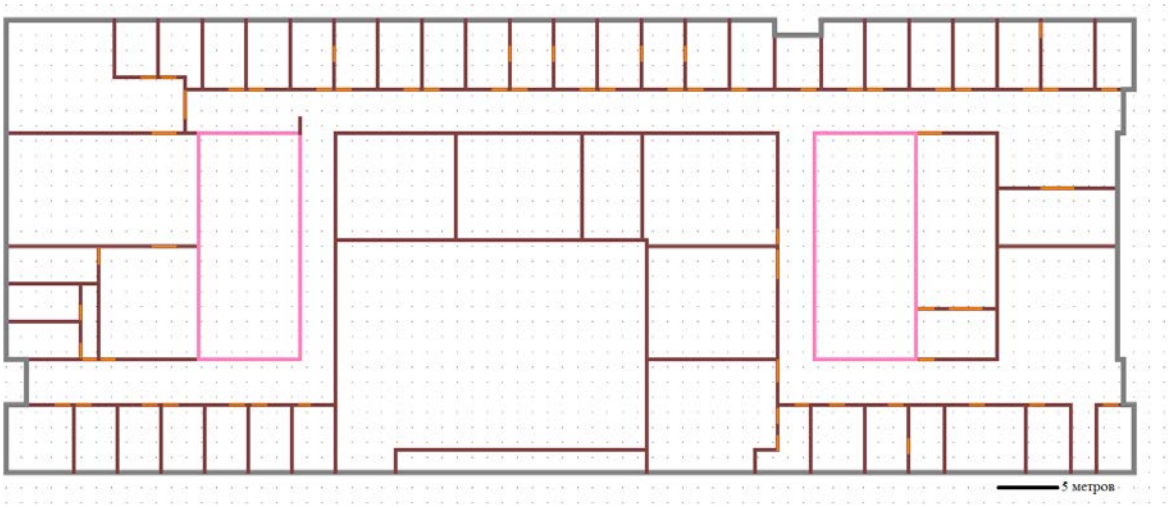


Рис. 1. 2D проекция офисного здания на высоте 1 метр

Параметры значений скорости выбраны из таблицы 1. Максимальная скорость загрузки в 32 Мбит/с соответствует модуляции 16-QAM и отношению сигнал-шум в случае воздействия АБГШ. В случае пересечения значений выбирается максимальная скорость.

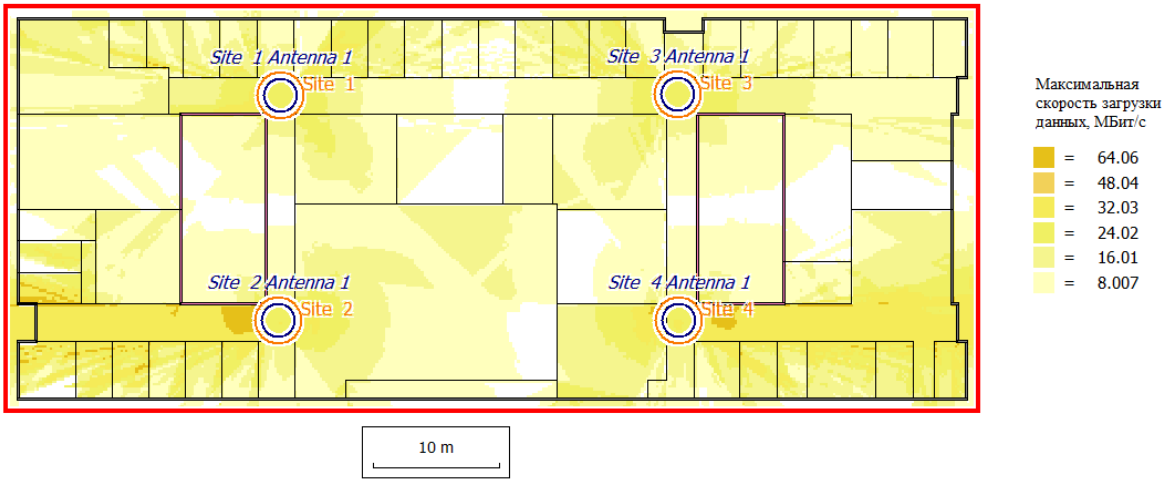


Рис. 2. Максимальная скорость загрузки данных на частоте 2.4 ГГц при использовании одной несущей для четырех точек доступа

Для корректного использования частотного диапазона следует определить для каждой точки пространства, от какой точки доступа сигнал в ней максимальный. Для частоты 2.4 ГГц существует 3 канала без пересечения по частотам. Следовательно, наилучший случай – зона обслуживания каждой точки доступа является смежной максимально для двух других точек доступа, в таком случае влияние интерференции значительно уменьшится. На рисунке 3 отображены зоны обслуживания каждой станции.

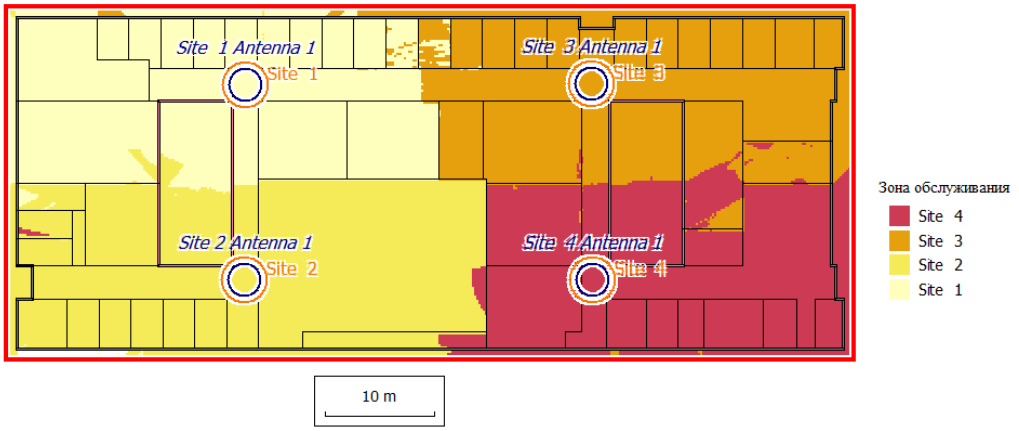


Рис. 3. Зоны обслуживания точек доступа

Результат моделирования (рис. 3) позволяет сделать вывод, что точки доступа 1 и 4 не имеют взаимных перекрытий зон доступа. Это позволяет использовать для них каналы на одной и той же частоте. Точки 1, 2 и 3 должны быть разнесены в частотном диапазоне.

На рисунке 4 представлены значения максимальной скорости загрузки данных для случая разнесении несущих частот.

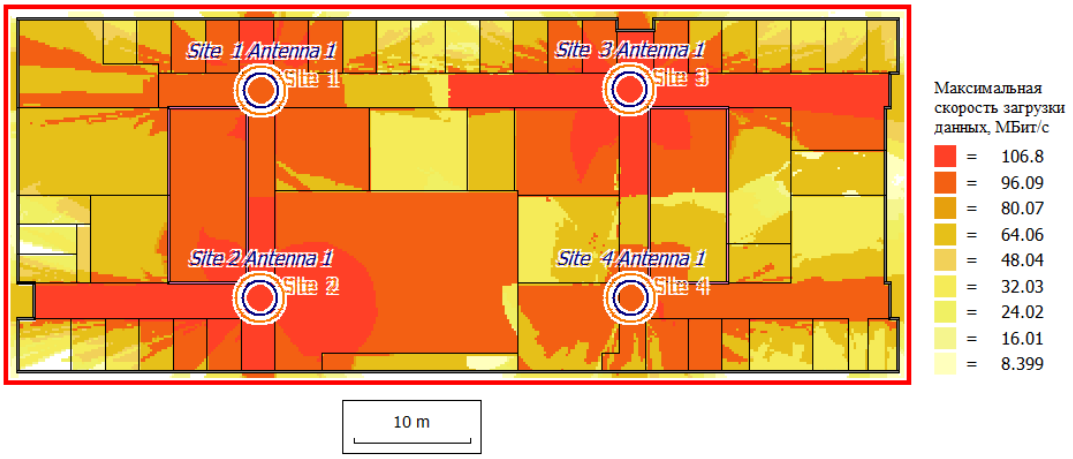


Рис. 4. Максимальная скорость загрузки данных на частоте 2.4 ГГц при разнесении несущих частот

Точки доступа 1 и 4 работают на одной частоте и ухудшают качество связи друг друга. Наиболее сильно это проявляется внутри их зон обслуживания в коридоре. Высокий уровень сигнала от другой точки доступа на той же частоте значительно увеличивает вклад интерференции в итоговое отношение сигнала к шуму и интерференции, из-за этого максимальная скорость беспроводного канала для точек 1 и 4 значительно отличается от точек 2 и 3.

Рассмотрим случай, когда точки доступа используют для обмена информацией между собой диапазон 5 ГГц, который имеет достаточное количество непересекающихся каналов. В отличие от связи точка доступа – абонентское устройство, где в большинстве сценариев приоритетнее скорость

загрузки, конфигурация mesh-сети подразумевает равный приоритет, как для приёма, так и для передачи информации.

На рисунке 5 представлены значения максимальной скорости передачи данных для первой точки доступа. Расчёт проведен только для одной точки доступа, поскольку при передаче другие точки доступа выступают в роли абонентского устройства. Первая точка доступа выбрана по причине наиболее длинного пути между точками 1 и 3.

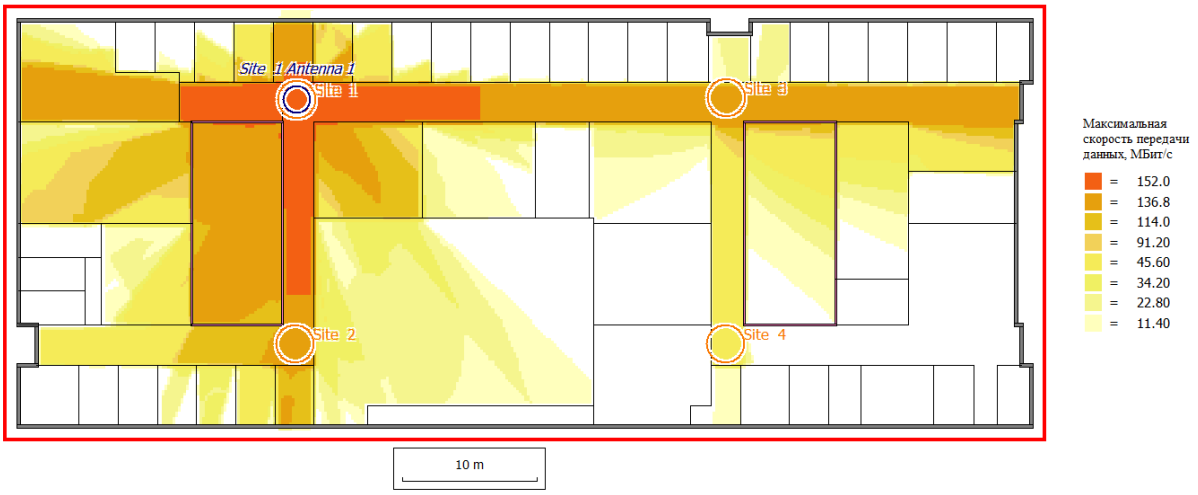


Рис. 5. Максимальная скорость передачи данных на частоте 5 ГГц при разнесении несущих частот

Канал связи между точками 1 и 3 имеет наибольшее затухание в среде распространения. Однако, скорость передачи между данными точками доступа остаётся выше, чем для случая обмена информацией с абонентским устройством. Использование mesh-сети может привести к созданию узкого места при одновременном использовании двух точек доступа на максимальной нагрузке. Такой сценарий маловероятен, поскольку высокая пропускная способность канала требуется или при большом количестве пользователей, или при больших объемах получаемой и передаваемой информации. Если пользователей слишком много, то стоит распределить нагрузку между большим количеством точек доступа, что не всегда может привести к увеличению скорости. При необходимости постоянной передачи больших объемов информации необходимо использовать проводной канал связи.

В целом, результаты моделирования подтверждают корректность построения mesh-сети на основе четырех точек доступа на одном этаже офисного здания. Зона обслуживания всех точек доступа практически полностью (за исключением одной комнаты) покрывает площадь здания и находится в пределах одной сети.

Спроектированная mesh-сеть не имеет дополнительной избыточности, поэтому выход из строя любой точки доступа приводит к полному отказу системы. Такое решение требует минимальных затрат из-за небольшого количества точек доступа.

Полученные в результате моделирования распределения уровня мощности сигнала позволяют сделать следующие заключения:

– с повышением порядка используемого типа модуляции уменьшается зона покрытия; при использовании только модуляции 256-QAM зона покрытия недостаточна для корректного развертывания mesh-сети на основе 4 точек доступа даже на частоте 2.4 ГГц;

– наличие в зоне прямой видимости двух точек доступа, использующих одну частоту, значительно снижает качество связи из-за неопределённости в определении предпочтительной точки доступа абонентским устройством.

Заключение. Использование mesh-сетей позволяет реализовать бесшовную зону покрытия, чей размер значительно превышает зону покрытия одной точки доступа. К их недостаткам следует отнести сложность настройки и потенциальные проблемы с интерференцией от нескольких беспроводных точек доступа при использовании пересекающихся частот, которые необходимо учитывать при их проектировании.

Моделирование беспроводных каналов связи является мощным инструментом, использование которого при проектировании эффективных и надежных беспроводных mesh-сетей, позволяет минимизировать эффекты интерференции, повысить скорость передачи данных и снизить количество проектных ошибок.

Список литературы

1. Постановление Правительства РФ от 20 октября 2021 г. N 1800 «О порядке регистрации радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств»: действует до 01.03.2028. Москва 2021. 28с.

2. Hiertz G. IEEE 802.11s: the WLAN mesh standard / G. Hiertz [and others] // IEEE Wireless Communications. 2010. P.104-111.

3. Вишневский В. Mesh-сети стандарта IEEE 802.11s: протоколы маршрутизации / Вишневский В. [и др.] // Первая миля. 2009. С. 16-21.

4. Yang K. Hybrid Routing Protocol for Wireless Mesh Network / K. Yang, Ma J., Miao Z. // 2009 International Conference on Computational Intelligence and Security. 2009. P.547-551

5. Ghumman S.A. Security in Wireless Mesh Networks // Halmstad University. Sweden, 2009. 54p.

6. Zhao Y. Indoor Radio Propagation Model Based on Dominant Path / Zhao Y., Li M., Shi F. // International Journal of Communications Network and System Sciences. 2010. P.330-337.

7. Рекомендация МСЭ-R P.2040-3. Влияние строительных материалов и структур на распространение радиоволн на частотах выше приблизительно 100 МГц // Ассамблея радиосвязи МСЭ-Р. 2023. 27с.

8. Kouyoumjian R.G. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface / R.G. Kouyoumjian, P.H. Pathak // Proceedings of the IEEE Volume 62. 1974. P.1448-1461.

9. Wahl R. Dominant Path Prediction Model for Urban Scenarios / R. Wahl [and others] // IST Mobile and Wireless Communications Summit. 2005. P.176-179

10. Proakis John G., I.Salehi Masoud. Digital Communications, 5th Edition // NY – McGraw-Hill Education, 2007. 1150 p.

Перфильев Александр Александрович, аспирант, taliors@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

Лупин Сергей Андреевич, канд. техн. наук, профессор, lupin@miee.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

USING MODELING TOOLS IN DESIGNING WIRELESS MESH NETWORK

A.A. Perfilev, S.A. Lupin

The paper considers the design features of mesh networks based on the 802.11ac protocol. Using modeling tools in the design process allows to significantly reduce the development time, improve the quality of wireless network planning and justify the use of specific technical methods and tools. Using modeling tools allows to find the optimal location of access points and their parameters, maximize coverage areas and reduce the impact of interference on wireless communication channels. The results of modeling in the Altair Feko environment are presented, which confirmed the possibility of using the proposed approach in practice.

Key words: wireless communication channels, mesh networks, modeling.

Perfilev Alexander Alexandrovich, postgraduate, taliors@yandex.ru, Russia, Moscow, National Research University of Electronic Technology,

Lupin Sergei Andreevich, candidate of technical sciences, professor, lupin@miee.ru, Russia, Moscow, National Research University of Electronic Technology

УДК 2.5.22
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-303-304

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ДОСТИЖЕНИЮ СОВЕРШЕНСТВА ЧЕРЕЗ УСТРАНЕНИЕ СКРЫТЫХ ПОТЕРЬ

А.В. Челенко, П.А. Новикова

В современных условиях повышения конкурентоспособности промышленных предприятий ключевым фактором успеха является достижение производственного совершенства. Данная статья посвящена разработке комплексного подхода к устранению скрытых потерь, которые существенно снижают эффективность производственных процессов. В работе анализируются основные источники скрытых потерь, включая неэффективное использование данных, нереализованный потенциал сотрудников, а также подрыв основ корпоративной культуры производства. Авторами предложен интегрированный метод, основанный на сочетании инструментов бережливого производства, анализа данных и цифровизации процессов. Особое внимание уделено выявлению скрытых потерь с помощью инструментов анализа больших данных и предложению мероприятий по их устранению. Представлены основные этапы комплексного подхода с целью выявления скрытых потерь, что позволит снизить затраты, увеличить производительность и повысить качество продукции. Проведенное исследование подтверждает, что комплексный подход к устранению скрытых потерь является важным инструментом для достижения производственного совершенства. Практическая значимость работы заключается в универсальности предложенного подхода, который может быть адаптирован для применения в различных отраслях промышленности. Данная работа может быть полезна для специалистов, занимающихся оптимизацией производственных процессов, а также для руководителей, стремящихся повысить конкурентоспособность своих компаний.

Ключевые слова: скрытые потери, бережливое производство, эффективность производства, цифровизация, анализ данных, цифровые двойники, комплексный подход.

В условиях сложного и динамично изменяющегося рынка промышленного сектора, подверженного влиянию технологических, информационных инноваций, нововведениям в управлении, автоматизации бизнес-процессов и продвижению искусственного интеллекта важным остается вопрос снижения всех видов затрат, включая скрытые, и повышение эффективности производственных систем для сохранения конкурентных преимуществ на мировом рынке. Любые преобразования в компании необходимо строить на основе четко сформулированной философии управления. Бережливое производство занимает ведущее место среди эффективных передовых практик совершенствования бизнес-процессов, ориентированное на их непрерывное улучшение исключая любые виды деятельности, не приносящие дополнительной ценности потребителю.

Развитие бережливого производства началось в Японии сразу после Второй мировой войны в ответ на ограниченные ресурсы, финансовые трудности и недостаток квалифицированных рабочих рук в автомобильном секторе. В компании Toyota усилиями Эйджи Тойоды и Тайити Оно была разработана эффективная "Производственная система Toyota", позже получившая название "Бережливое производство" [1].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью выявления скрытых потерь и их полного устранения в условиях сложных и многокомпонентных производственных систем, требующих комплексного подхода, объединяющего методы анализа, моделирования и применения современных цифровых технологий.

Целью исследования является разработка и обоснование комплексного подхода к анализу и устранению скрытых потерь на машиностроительных производствах для повышения устойчивости компании в условиях рыночной конкуренции.

Скрытые потери. Упреждение скрытых потерь является одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность и производительность производственных систем, проявляющиеся на различных этапах потока создания ценности. Не все скрытые потери возможно выразить в числовых показателях, многие из них имеют неочевидную природу и проявляются косвенно. Основные виды скрытых потерь, которые могут возникать на производстве:

1. Перепроизводство (Выпуск продукции сверх необходимого объёма или заранее установленного плана. Такая избыточная продукция может стать проблемой, так как занимает место на складе, требует ресурсов для хранения и обслуживания и даже может испортиться или устареть. Перепроизводство связано с ненужными затратами на материалы и рабочее время, что снижает общую эффективность производства.);

2. Дефекты и переделка (Данный вид скрытых потерь возникает из-за брака, который обнаруживается в процессе производства или после его завершения. Такие потери требуют дополнительного времени и ресурсов на исправление ошибок и доработку продукции, что увеличивает производственные издержки.);

3. Перемещение (Лишние движения персонала, материалов или оборудования в процессе производства. Такие перемещения увеличивают не только общее время выполнения операций, но и создают условия для неэффективной организации рабочего пространства, а также могут вызывать усталость персонала.)

4. Ожидание (Простой оборудования или персонала из-за задержек, вызванных несогласованностью операций или недостаточной организацией процессов. Ожидание может возникнуть, если один из этапов производства занимает больше времени, чем следующий, или если оборудование выходит из строя, а запасных частей для быстрого ремонта нет.);

5. Излишняя обработка (Выполнение лишних операций, которые не повышают ценность продукта.);

6. Запасы (К ним относятся материалы, полуфабрикаты, готовая продукция, которые хранятся на складе и ожидают использования, тем самым они требуют места для хранения и затраты на обслуживание.);

7. Транспортировка (Перемещение сырья и готовой продукции между производственными зонами или участками. Длительная и избыточная транспортировка увеличивает не только время, но и затраты на производство.);

8. Нереализованный потенциал сотрудников (Возникает из-за неиспользованных возможностей, знаний и навыков сотрудников, которые могли бы улучшить производственные процессы, повысить качество продукции или оптимизировать затраты. Этот вид не связан напрямую с материальными ресурсами, но он может повлиять на эффективность работы.);

9. Неэффективное использование данных (Сбор большого количества данных на предприятии часто остается не используемым или используется неэффективно. Сбор данных без анализа или внедрения аналитики приводит к тому, что предприятие может остаться без потенциальных улучшений в производительности и качестве.).

10. Подрыв основ корпоративной культуры производства, как системы для осуществления производственной деятельности (Отсутствие необходимого участия руководства ослабляет взаимодействие между сотрудниками и отделами, что приводит к недопониманию и ошибкам в исполнении поручений. Максимальная полезность каждого сотрудника снижается, что отражается на достижении конечных целей.).

В литературе описаны методы, направленные на выявление и устранение скрытых потерь в производственных процессах [2]. Также с методами, устраняющими скрытые потери, можно ознакомится в работе А. В. Челенко [3]. Для того чтобы наиболее подробно узнать о видах скрытых потерь, которые были представлены выше, была изучена работа Майкла Вейдера [4].

Метод бережливого производства (Lean). Система бережливого производства, ставшая сегодня наиболее распространенной на промышленных предприятиях мира, представляет собой синтез множества подходов к совершенствованию бизнес-процессов, разрабатывавшихся на протяжении более ста лет [5]. Бережливое производство широко применяется для устранения потерь, которые связаны с неэффективны использованием ресурсов, избыточными запасами и другими видами «муда» — то есть действий, не добавляющих ценности конечному продукту. В рамках бережливого производства часто используются такие инструменты, как 5S, канбан, картирование потока создания ценности (VSM), Andon и другие, способствующие выявлению скрытых потерь в производственном процессе [6]. В основе бережливого производства лежит стремление к устранению всего, что затрудняет, замедляет и повышает себестоимость производства. Метод ориентирован на достижение максимальной эффективности в создании продукции, активно привлекая каждого сотрудника к процессу постоянных улучшений.

Майкл Уллехэйн подчеркивает, что успех бережливого производства заключается в построении системы, которая непрерывно эволюционирует [7].

В. Шпер трактует бережливое производство, как философию, меняющую мышление сотрудников и руководителей [8].

Метод «Шесть сигм». «Шесть сигм»– это разработка компании Motorola в 1986 году, которая приобрела статус важнейшего инструмента управления под руководством Джека Уэлча в General Electric, представляет

собой комплексный подход к совершенствованию качества бизнес-процессов, значительно сокращающих скрытые потери, дефекты, ошибки, где статистические методы выступают основным элементом успеха.

Внедрение метода «Шесть сигм» подразумевает применение пошагового алгоритма DMAIC (определение, измерение, анализ, улучшение, контроль) для эффективного решения задач, а также использование методики DFSS (Design for Six Sigma) для оптимизации проектируемых процессов.

Эффективная реализация системы «Шесть сигм» требует создания инфраструктуры с шестью уровнями подготовки специалистов (чемпион, MBB, BB, GB, желтый и белый пояса), символизирующими уровни подготовки и вовлеченности участников, отражая их значимость в процессе улучшений [9].

Среди сильных сторон метода выделяют достижение конкретных, поддающихся измерению результатов, приоритетность интересов потребителей и устойчивое развитие предприятия. Внедрение «Шесть сигм» сопряжено с высокими затратами на подготовку кадров и инструментария. В процессе реализации проектов возможно подавление творческого потенциала сотрудников.

Томас Пайн считает, что «Шесть сигм» — это не просто устранение дефектов, но и формирование культуры непрерывного развития и улучшений [10]. Карлос А. Эскобар говорит о том, что в эпоху наступившей эры Качество 4.0 инновационный потенциал «Шесть сигм» достиг своего предела, но все же остается востребованным многими предприятиями [11].

Метод статистического анализа данных. Статистический анализ данных лежит в основе многих современных методов управления качеством и выявления скрытых потерь. Он предполагает использование таких инструментов, как контрольные карты, регрессионный анализ и факторный анализ, которые позволяют выявлять отклонения и скрытые закономерности в производственных процессах [12]. Статистический анализ данных ограничен только количественными показателями и не всегда позволяет учесть сложные взаимосвязи между процессами и качественными характеристиками, например, износ оборудования или снижение квалификации персонала. Главной целью этого метода является выявление ключевых проблем и возможностей, которые способствуют лучшему пониманию текущей ситуации на производстве и которые смогут спрогнозировать будущие тенденции. Анализ данных происходит с помощью статистических методов, таких как регрессионный анализ или кластеризация, где выделяется ключевые связи между переменными, а также зависимости между ними.

Генити Тагути доказал, что применение статистических методов помогает установить наиболее эффективные параметры, ведущие к высокому уровню качества [13].

У. Э. Деминг утверждает, что применение статистической информации позволяет избежать субъективизма и принимать решения, опираясь на достоверные факты [14].

Метод предсказательной аналитики и машинного обучения. С развитием цифровых технологий методы прогнозной аналитики и машинного обучения стали важными инструментами для анализа скрытых потерь. Прогнозная аналитика, основанная на анализе больших данных, позволяет создавать модели, которые могут прогнозировать выход оборудования из строя, а также выявлять скрытые закономерности в производственных процессах [15]. Это позволяет не только обнаружить существующие потери, но и предотвратить их, делая производственные процессы более устойчивыми. Как отмечают в работе [15], прогнозная аналитика требует больших объёмов данных и мощных вычислительных ресурсов, что ограничивает её применение на малых и средних предприятиях. Одной из особенностей прогнозной аналитики и машинного обучения является сбор большого объема данных, после чего, как утверждает Тревор Хасти [16], данные очищаются и форматируются для последующего анализа. Также для машинного обучения немало важным является оценка и корректировка модели. Кристофер Бишоп [17] высказывал мнение о том, чтобы повышать точность модели, которая проходит тестирование на новых данных. Это помогает производству принимать наиболее точные решения и адаптироваться к изменяющимся условиям.

Цифровые двойники. Современные подходы к анализу скрытых потерь включают использование цифровых двойников. Цифровые двойники — это любая цифровая модель любых объектов, систем, процессов. Данная цифровая модель представляет собой виртуальные копии производственного оборудования, которые позволяют моделировать и отслеживать состояние реальных объектов в режиме реального времени [18]. Цифровые двойники позволяют анализировать производственные процессы и прогнозировать возможные проблемы, выявляя скрытые потери. Данный метод анализа производства позволяет моделировать различные сценарии и тестировать их без физического вмешательства. Майкл Гривз и Джон Викерс [19] считали, что это наиболее полезно для оптимизации и экспериментирования. Также следует отметить, что цифровые двойники с помощью данных, получаемых в реальном времени, помогают предсказать, когда и где может возникнуть проблема. Фей Тао [20] в своей работе делал акцент на то, что прогнозирование неисправностей может помочь заранее планировать обслуживание и сокращать простои оборудования.

Результаты. Таким образом, каждый из рассмотренных методов имеет свои сильные и слабые стороны. В таблице 1 указаны основные преимущества и недостатки каждого из вышеперечисленных методов.

Комплексный подход анализа и устранения скрытых потерь. Комплексный подход – это такой подход, при котором предполагается использование нескольких взаимодополняющих методов и инструментов для анализа и устранения скрытых потерь.

Преимущества комплексного подхода:

1. Данный подход решает проблему комплексно, а не изолированно как другие методы;

2. Проблема рассматривается с разных точек зрения;

3. Данный подход объединяет различные методы и инструменты для повышения точности и эффективности;

4. Комплексный подход позволяет эффективно распределять ресурсы, будь то время, финансы или персонал.

К недостаткам комплексного подхода можно отнести:

1. большие затраты на внедрение и мониторинг;

2. отсутствие или недоступность большого объема данных (это затрудняет эффективность комплексного подхода);

3. большие затраты на обучение сотрудников, и дальнейшее поддержание их высокой квалификации;

4. снижение оперативности принятия решений для простых задач.

В комплексном подходе выделяют несколько важных этапов, которые направлены на выявление и устранение скрытых потерь. В таблице 2 представлены основные этапы комплексного подхода и инструменты, применяемые для устранения скрытых потерь на конкретных стадиях, что приводит к последовательному улучшению производственных процессов и добиваться качественного результата.

Таблица 1

Преимущества и недостатки методов анализа скрытых потерь

Метод	Преимущества	Недостатки	Причины неэффективности для комплексного подхода
Lean (Бережливое производство)	- Оптимизация потоков, создающих ценность	- Фокусируется только на очевидных видах потерь - Требует постоянного обучения персонала - Не охватывает менее заметные потери - Отсутствие принятой методики оценки результатов	- Не всегда идентифицирует скрытые потери
Шесть Сигм	-Способствует снижению количества дефектов и повышению качества - Основан на глубоком статистическом анализе -Имеет структурированный подход	-Высокая стоимость внедрения -Занимает много времени -Требует квалифицированных специалистов	- Затратный для малых предприятий, требующих гибкости и быстрого реагирования
Статистический анализ	- Обеспечивает количественные данные - Подходит для контроля качества и оценки производительности	- Не учитывает сложные взаимосвязи между процессами и качественными характеристиками -Требует квалифицированных кадров в области статистики	- Охватывает только количественные факторы и игнорирует качественные, что снижает его способность анализировать комплексные причины потерь
Предсказательная аналитика и машинное обучение	-Может прогнозировать отказы оборудования и профилактическое обслуживание - Выявляет скрытые закономерности в больших данных	- Высокая стоимость внедрения и поддержки - Требует больших объемов данных и вычислительных мощностей - Зависит от квалификации специалистов	- Может оказаться неэффективным для небольших предприятий, где невозможно собрать достаточно данных для точного прогнозирования
Цифровые двойники	-Позволяет моделировать и контролировать процессы в режиме реального времени -Предотвращает потенциальные проблемы заранее	-Дорогостоящее внедрение и интеграция с оборудованием -Сложность настройки и обслуживания системы -Требует	-Трудоёмкость и высокая стоимость реализации делают его недоступным для компаний с ограниченным бюджетом

		высокотехнологичной инфраструктуры	

Таблица 2

Основные этапы комплексного подхода с целью выявления скрытых потерь

Название этапа	Описание этапа	Методы и инструменты для устранения скрытых потерь
1. Идентификация скрытых потерь и определение цели	Выявление основных видов скрытых потерь, определение цели и задачи анализа.	Проведение аудитов, интервью с сотрудниками, анализ процессов с помощью карт потока создания ценности (VSM), диаграммы Исикавы для выявления причинно-следственных связей.
2. Сбор данных и создание базы для анализа	Систематический сбор данных о процессах и скрытых потерях, создание базы данных для анализа.	ERP-системы, датчики IoT для сбора данных о работе оборудования, контрольные карты, BI-системы для анализа данных, журналы учета и отчеты о производительности.
3. Первичный анализ и устранение видимых потерь	Использование Lean-методов для выявления и устранения скрытых потерь.	5S для улучшения организации рабочих мест, стандартизации процессов, устранения ненужных этапов процесса, Канбан для управления запасами.
4. Уменьшения дефектов, повышение стабильности производственного процесса	Применение статистических методов для выявления и устранения дефектов и отклонений в производственном процессе.	Методы DMAIC для анализа и улучшения процессов, контрольные карты для отслеживания качества, диаграммы Парето для определения ключевых проблем, FMEA (анализ видов и последствий отказов) для предупреждения дефектов.
5. Статистический анализ данных для обнаружения скрытых тенденций и отклонений	Применение статистических методов для выявления скрытых потерь и долгосрочных отклонений, влияющих на производительность.	Регрессионный анализ, корреляционный анализ для изучения зависимости факторов, контрольные карты для отслеживания процессов, диаграммы рассеивания для визуализации данных.
6. Применение предсказательной аналитики и цифровых двойников	Прогнозирование возможных сбоев и потерь на основе собранных данных, что позволяет заранее устранять потенциальные проблемы.	Применение машинного обучения для предсказания отказов, цифровые двойники для моделирования процессов и оборудования, предсказательная аналитика для определения вероятности отказов оборудования.
7. Внедрение системы постоянного мониторинга и обратной связи	Создание системы мониторинга и обратной связи для постоянного контроля за устранением скрытых потерь и поддержанием стабильности.	SCADA-системы, ANDON-системы для мониторинга оборудования, автоматизированные контрольные панели для визуализации данных, KPI-отчеты, регулярные инспекции и аудиты, опросы сотрудников для обратной связи.
8. Оценка результатов и корректировка стратегии	Анализ эффективности предпринятых мер, оценка достижений и внесение необходимых изменений для дальнейшего улучшения процессов.	Сравнительный анализ KPI до и после изменений, анализ ROI для оценки экономической эффективности.

Заключение. Предлагаемый комплексный подход к анализу и устранению скрытых потерь сочетает в себе современные методы и инструменты, позволяя полностью и поэтапно рассмотреть проблему скрытых потерь. Такая методология позволяет выявить и устранить факторы, которые не всегда очевидны, но оказывают существенное влияние на производительность, качество выпускаемой продукции и экономическую эффективность предприятия.

На практике такой подход может быть реализован на машиностроительном предприятии. Начиная с предварительной оценки и сбора данных, специалисты могут выявить наиболее существенные потери и устранить их,

используя проверенные методы бережливого производства и статистический анализ. Внедрение системы постоянного мониторинга и цифровых инструментов позволяет отслеживать изменения в режиме реального времени. Именно это обеспечивает гибкость и адаптивность процессов.

Применение комплексного подхода не только позволит уменьшить скрытые потери, но и создать устойчивую превентивную систему, которая позволит минимизировать их проявление в будущем, что позволит укрепить конкурентные преимущества предприятия. В долгосрочной перспективе это приведет к лучению качества выпущенной продукции, уменьшению затрат и более эффективному использованию ресурсов.

Список литературы

1. Цунёси Нодзи Toyota путь к совершенству. М.: Бомбора, 2024. 271 с.

2. Кухтина Е.К. Разработка алгоритма исследования предприятия с целью последующего формирования модели устойчивого развития / Е. К. Кухтина, О. Л. Перерва // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Т. 13, № 12. С. 5343-5364.

3. Челенко А.В. Управление качеством изделий машиностроительного производства путем установления функциональных и корреляционных зависимостей точностных показателей // Контроль качества продукции. 2024. № 7. С. 56-60.

4. Майкл Вейдер Инструменты бережливого производства II: Карманное руководство по практике применения Lean. 11. М.: Альпина, 2017. 116 с.

5. Челенко А.В. Исследование генеалогического древа современных систем управления качеством // Инновации в менеджменте. 2023. № 2(36). С. 72-79.

6. Калмыков В.В. Анализ инструментов бережливого производства для оптимизации загрузки производственного оборудования / В. В. Калмыков, В. Н. Атрощенко, К. Г. Короходкина // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2018. № СВ1(18). С. 7-12.

7. Уллехэйн М. Turning Japanese: Lean lessons for global success. Нью-Йорк : Free Press, 2010. 256 с.

8. Шпер В.Л. Путь к здоровью. М.: Издательство "Экономика", 2020. 320 с.

9. Челенко А.В. Разработка алгоритмов DMAIC и DMADV при внедрении LSS в машиностроительное производство // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 468-472.

10. Пайн Т., Питер С. Шесть сигм: Как General Electric, Motorola и другие ведущие компании совершенствуют свою работу / Питер С. Пандэ, Роберт П. Ньюман, Роланд Р. Кавanах ; пер. с англ. М. : Изд-во стандартов, 2000. 448 с.

11. Escobar C.A., Macias-Arregoyta D., Morales-Menendez R. The decay of Six Sigma and the rise of Quality 4.0 in manufacturing innovation //Quality Engineering. 2024. Т. 36. №. 2. С. 316-335.

12. Douglas C. Montgomery Introduction to Statistical Quality Control / Douglas C. Montgomery, 8-th ed.. John Wiley & Sons, 2020. 768 с.

13. Тагути Г. Методы Тагути: планирование экспериментов / Г. Тагути; пер. с англ. А. Б. Петров. М.: Радио и связь, 1990. 496 с.

14. Деминг, У. Э. Использование статистических данных в управлении : лекция. Нью-Йорк, 10 октября 2005 г.

15. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение/ пер. с анг. А.А. Слинкина. 2-е изд.. М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с.

16. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction / Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman 2-nd ed. New York: Springer, 2009. 764 с.

17. Christopher M. Bishop Pattern Recognition and Machine Learning / Christopher M. Bishop. New York: Springer, 2006 758 с.

18. Michael Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication // Digital Twin White Paper. 2014. С. 7.

19. Michael Grieves, John Vickers Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / Michael Grieves, John Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. 2016. С. 85-113.

20. Fei Tao, Senior Member, IEEE, He Zhang, Ang Liu, and A. Y. C. Nee Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / Fei Tao, Senior Member, IEEE, He Zhang, Ang Liu, and A. Y. C. Nee // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS. 2019. № 4. С. 2405-2415.

Челенко Александра Викторовна, канд. техн. наук, доцент, chelav@bmstu.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана,

Новикова Полина Александровна, студент, novikovapa@student.bmstu.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана

A COMPREHENSIVE APPROACH TO ACHIEVING EXCELLENCE THROUGH ELIMINATING HIDDEN LOSSES

A.V. Chelenko, P.A. Novikova

In modern conditions of increasing the competitiveness of industrial enterprises, the key success factor is the achievement of industrial excellence. This article is devoted to the development of an integrated approach to eliminate hidden losses that significantly reduce the efficiency of production processes. The paper analyzes the main sources of hidden losses, including inefficient use of data, unrealized potential of employees, as well as undermining the foundations of the corporate culture of production. The authors propose an integrated method based on a combination of lean manufacturing tools, data analysis, and process digitalization. Special attention is paid to identifying hidden losses using big data analysis tools and suggesting measures to eliminate them. The main stages of an integrated approach are presented in order to identify hidden losses, which will reduce costs, increase productivity and improve

product quality. The conducted research confirms that an integrated approach to eliminating hidden losses is an important tool for achieving production excellence. The practical significance of the work lies in the versatility of the proposed approach, which can be adapted for use in various industries. This work can be useful for specialists involved in optimizing production processes, as well as for managers seeking to increase the competitiveness of their companies.

Key words: hidden losses, lean manufacturing, production efficiency, digitalization, data analysis, digital twins, integrated approach.

Chelenko Alexandra Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, chelav@bmstu.ru, Russia, Kaluga, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University,

Novikova Polina Aleksandrovna, student, novikovapa@student.bmstu.ru, Russia, Kaluga, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University

УДК 621.37.332.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-312-313

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОТРАЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ И ПРИЛЕГАЮЩИХ К НИМ ПОКРОВОВ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

М.С. Андрющенко, В.М. Степанов

В статье представлен анализ результатов отечественных и зарубежных исследований поляризационных характеристик радиолокационного отражения лесных и прилегающих к ним покровов. Приведены зависимости величины удельной эффективной площади рассеяния подстилающих фонов от угла наблюдения для вертикальной, горизонтальной и кросс-поляризаций зондирующего сигнала в диапазонах частот 35 и 94 ГГц для хвойного, лиственного леса, кустарника. В качестве прилегающих покровов рассмотрены пашня, земля, покрытая травой, асфальтовые и бетонные дороги. По результатам обобщения данных были построены кривые, описывающие зависимость динамического диапазон изменения поляризационных характеристик отражения от угла наблюдения.

Ключевые слова: радиолокация, миллиметровый диапазон длин волн, дистанционное зондирование, эффективная площадь рассеяния, зондирующий сигнал, поляризация излучения.

В настоящее время интенсивно развиваются радиолокационные системы миллиметрового диапазона. В частности, они находят свое применение при дистанционном зондировании земных покровов, при обнаружении наземных объектов, в лесном хозяйстве и др. [1–5].

Для решения различного рода прикладных задач необходимо знание отражательных характеристик реальных земных покровов с учетом угловой зависимости величины обратного отражения, поляризации зондирующего

сигнала. В частности, радиолокационные характеристики обратного отражения фона должны учитываться при оценке уровня радиолокационной заметности наземных объектов. Величина последней для различных типов подстилающих поверхностей может отличаться на порядок и более [6]. Поляризационные характеристики радиолокационного отражения подстилающих поверхностей могут быть полезны при разработке новых методов обнаружения объектов на фоне мешающих отражений.

В лесном хозяйстве результаты радиолокационного зондирования могут использоваться при исследованиях плотности растительных покровов, распределения лесных массивов и прилегающих к ним покровов, лесотаксационных характеристик, они могут характеризовать виды почв, их температуру и влажность [3–5].

Целью настоящей статьи являлось выявление отличий и закономерностей поляризационных характеристик радиолокационного отражения для лесных и прилегающих к ним покровов, полученных в миллиметровом диапазоне длин волн. Для достижения поставленной цели в настоящей статье ***решались задачи*** поиска и систематизации отечественных и зарубежных публикаций (см. например, работы [7–15]), содержащихся в них результатов экспериментальных исследований, выявления различий поляризационных характеристик лесных покровов и иных, прилегающих к ним подстилающих поверхностей в миллиметровом диапазоне длин волн.

При радиолокационном зондировании земных покровов используются ***методы исследований*** с применением РЛС бокового обзора, радиолокаторов с синтезированной апертурой (САР), расположенных на борту самолета или спутника, а также методы радиолокационной интерферометрии и поляриметрии. Полноту информации о характеристиках отражения могут обеспечить многочастотные и многополяризационные методы исследований [1–5, 16, 17].

Основными факторами, влияющими на величину отраженного радиолокационного сигнала от подстилающей поверхности, являются: ее неровность, комплексная диэлектрическая проницаемость, угол падения волны, поляризация, и частота излучения. Количественной оценкой отражающих свойств является удельная ЭПР земной поверхности:

$$\sigma^0 = \sigma_S / \Delta S, \qquad (1)$$

где σ_S – ЭПР участка земной поверхности, занимаемого элементом разрешения РЛС, а ΔS – площадь этого участка.

Наиболее существенно на величину удельной ЭПР земной поверхности влияет степень ее неровности. В соответствии с критерием Релея [7] поверхность считается гладкой, если

$$\sigma_h > \lambda / 8 \sin\psi, \qquad (2)$$

где σ_h – среднеквадратичная высота неровностей, λ – длина волны, ψ – угол скольжения (или между направлением визирования и горизонтом). В дальнейшем при описании характеристик отражения будем пользоваться величиной угла наблюдения β (т.е. углом между направлением визирования и вертикалью).

Рассмотрим примеры зависимостей удельной ЭПР от угла наблюдения. Этот угол является другим важным параметром, влияющим на величину σ^0. При малых значениях угла β (вблизи нормали к поверхности) значение обратного отражения максимально, а с ростом (при приближении к горизонту) становится наименьшим.

Введем обозначения поляризаций излучения: ВП – вертикальная; ГП – горизонтальная; КП – кросс-поляризация. Погрешность экспериментального определения удельной ЭПР методом сравнения обычно составляет величину около 2…3 дБ [7].

Лес, кустарник. Хвойный лес, лиственный лес или кустарники при наличии листвы, являются классическими примерами диффузно - рассеивающих поверхностей [1]. Следовательно, им характерна слабая зависимость σ^0 от поляризации и угла наблюдения. Зависимость от угла наблюдения в большой степени определяется влиянием подстилающей поверхности земли. Примеры зависимостей удельной ЭПР от угла наблюдения для лиственного леса, а также кустарника представлены на рисунках 1…6.

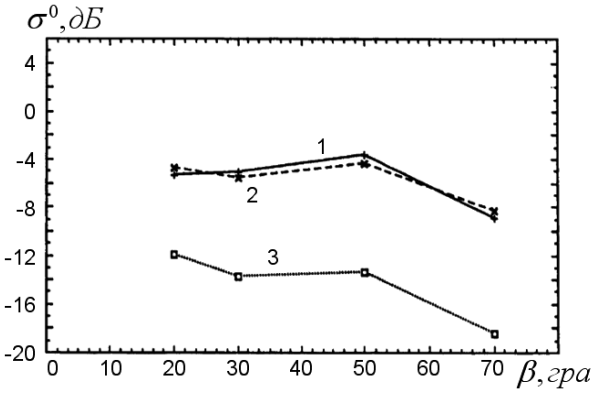


Рис. 1. Частота 94 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 – КП. Фон – лес (дуб) [9]

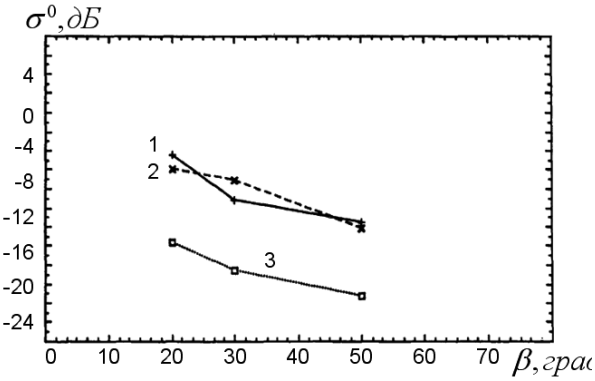


Рис. 2. Частота 35 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 – КП. Фон – лес (дуб) [9]

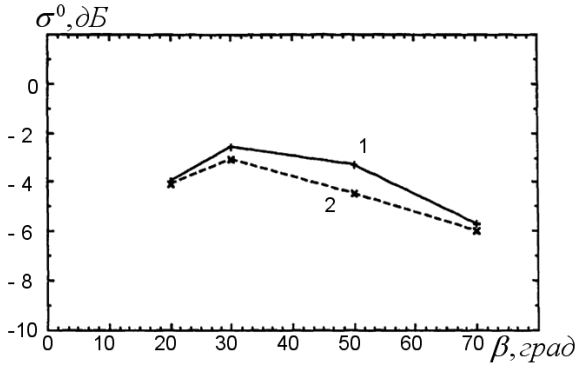


Рис. 3. Частота 94 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП.Фон – кусты белого кедра высотой 3 м [9]

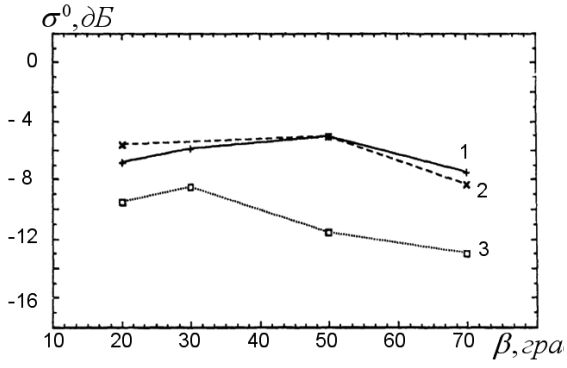


Рис. 4. Частота 35 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 – КП. Фон – кусты белого кедра высотой 3 м [9]

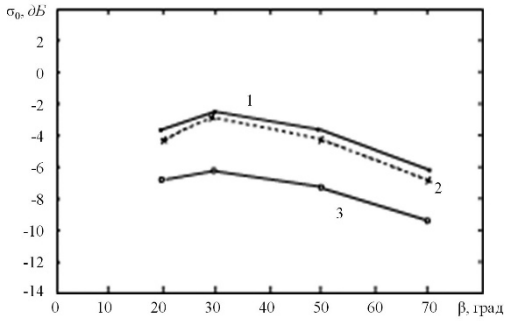


Рис. 5. Частота 94 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП, 3 – КП. Фон – голубая и норвежская ель [9]

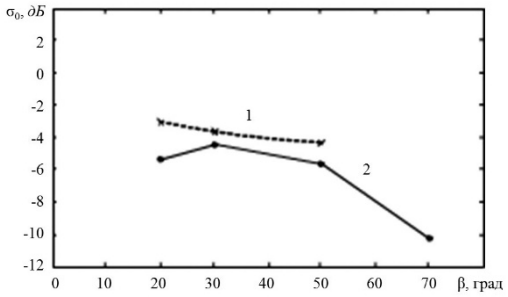


Рис. 6. Частота 35 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП. Фон – голубая и норвежская ель [9]

Анализ приведенных графиков показывает, что значения удельной ЭПР на вертикальной и горизонтальной поляризациях близки друг к другу, а кросс-поляризационная составляющая отраженного сигнала мала по сравнению с удельной ЭПР для ВП и ГП.

Такой же вывод следует из анализа экспериментальных данных (рис. 7) для различных участков леса (как лиственного, так и хвойного) в диапазоне частот 35 ГГц, приведенных в работе [10]. На рисунке группа кривых 1 соответствует данным для вертикальной и горизонтальной поляризации зондирующего излучения, а группа кривых 2 – кросс-поляризации.

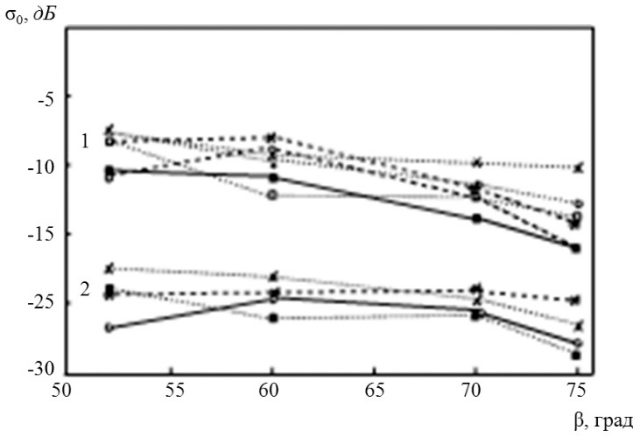


Рис. 7. Частота 35 ГГц; 1 – ВП и ГП, 2 – КП [10]

Поверхность земли, покрытая травой. Данные по результатам измерений отражательных характеристик подстилающей поверхности с травяным покровом различной высоты (без деревьев и кустарника) можно найти в публикациях [9, 11, 12]. На рисунках 8 и 9 представлены результаты исследований отражательных характеристик земной поверхности, покрытой травой различной высоты в зависимости от угла наблюдения β.

Результаты измерений показывают, что участки поверхности земли, покрытые высокой травой также, как и лесные покровы, характеризуются близкими значениями σ^0 для ВП и ГП, значительно превышающими σ^0 для кросс-поляризации.

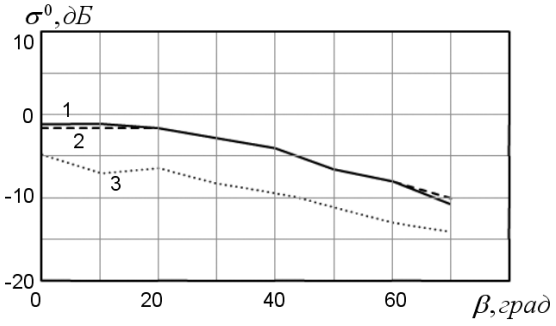


Рис. 8. Частота 35 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 – КП. Фон – высокая трава [9]

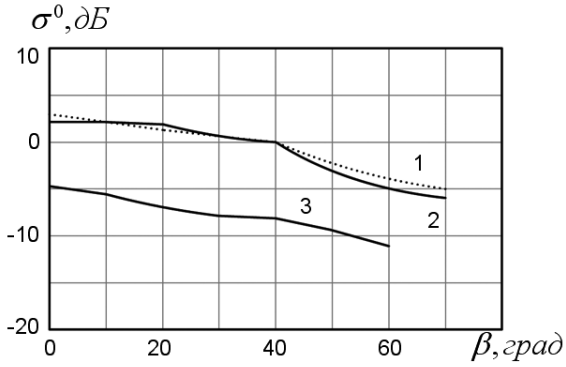


Рис. 9. Частота 95 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 – КП. Фон – высокая трава [9]

Снежный покров. Отражение от снежного покрова зависит от его плотности, влажности и толщины. Для поверхностей со снежным покровом, как и для фонов с густой растительностью, характерно незначительное различие (в пределах 1…3 дБ) значений удельной ЭПР на ВП и ГП и значительное снижение отражения на КП (примерно на 10 дБ). Примеры зависимостей σ^0 для снежного покрова приведены на рисунках 10…12.

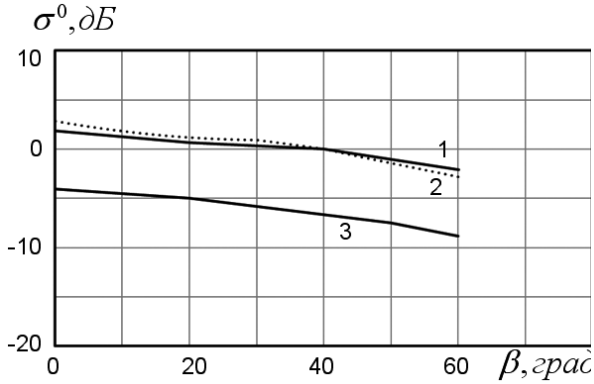


Рис. 10. Частота 94 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 – КП. Фон – сухой снег [11]

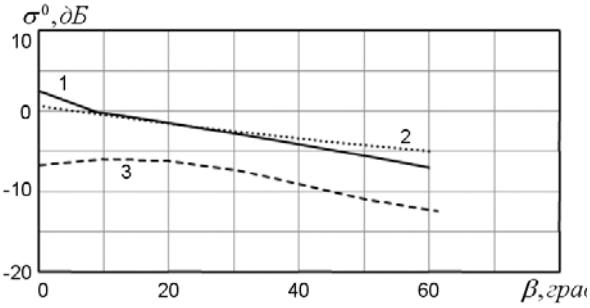


Рис. 11. Частота 35 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 – КП; Фон – сухой снег [11]

Обычно выпадение снега увеличивает отраженный сигнал от подстилающего фона. Вместе с тем, отражение от сухого, недавно выпавшего снега может быть низким. При частых перепадах температур снег может таять и повторно замерзать много раз, что приводит к росту его отражательной способности. В миллиметровом диапазоне влажность снежного покрова из-за сильного поглощения может вызвать существенное уменьшение σ^0. В сухом снеге рассеивание излучения происходит в его внутреннем объеме.

По результатам обобщения данных из [8, 18, 19] на рисунке 6 показан динамический диапазон изменения удельной ЭПР для различных видов снежного покрова для частоты 35 ГГц. Таким образом, значение ЭПР снежных покровов может меняться в широких пределах. Дополнительные данные удельной ЭПР снежных покровов можно найти в [9, 12].

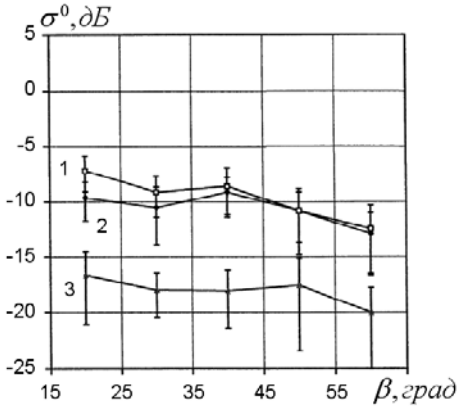


Рис. 12. Частота 35 ГГц; 1 – ГП; 2 – ВП; 3 – КП. Фон – мокрый снег толщиной 12 – 23 см [13]

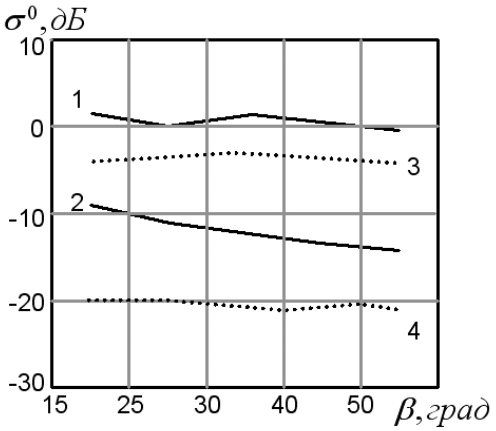


Рис. 13. Динамический диапазон изменения σ^0. Частота 35 ГГц; 1 и 2 – верхняя и нижняя границы изменения для ВП и ГП; 3 и 4 – для КП. Фон – снежный покров разной толщины [13]

Почва (пашня). Радиолокационное отражение от почвы (пашни) в значительной степени зависит от степени ее неровности и влажности. На рисунках 14 и 15 представлены зависимости удельной ЭПР для различного содержания влаги в почве, на рисунке 16 – зависимости σ^0 для земли, покрытой льдом для диапазона 35 ГГц.

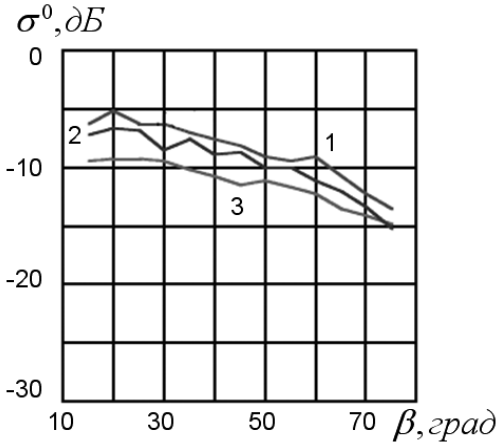


Рис. 14. Частота 94 ГГц; ГП. Содержание влаги: 1 – высокое; 2 – среднее; 3 – низкое [14]

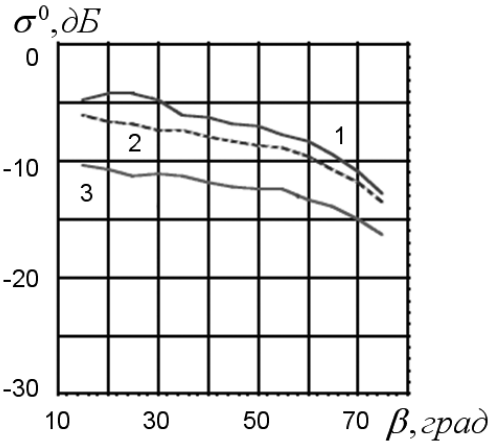


Рис. 15. Частота 35 ГГц; ГП. Содержание влаги: 1 – высокое; 2 – среднее; 3 – низкое [14].

Асфальт, бетон, гравий. Асфальтовые и бетонные покрытия являются более гладкими, нежели покрытия с гравием. Поэтому они имеют меньшее значение σ^0. Примеры зависимостей удельной ЭПР для асфальта и гравия представлены на рисунках 17…19. Для гладких поверхностей

(асфальт, бетон) отмечается сильная зависимость от поляризации излучения (ВП или ГП), особенно при больших углах наблюдения. Вода на поверхности асфальта и бетона уменьшает отражение при углах наблюдения, больших 10°.

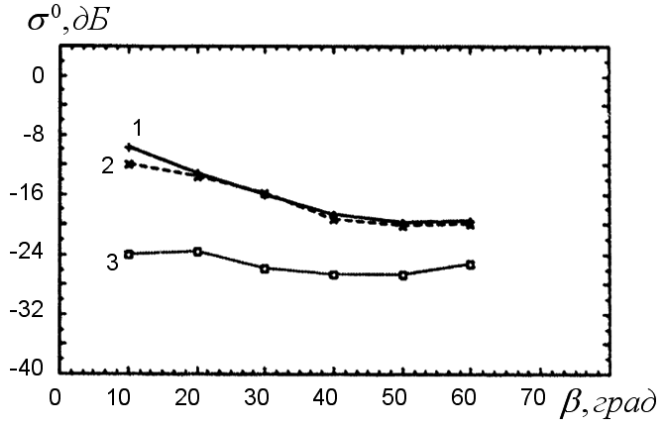


Рис. 16. Частота 35 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 – КП. Фон – земля, покрытая льдом, вода (10%) [9]

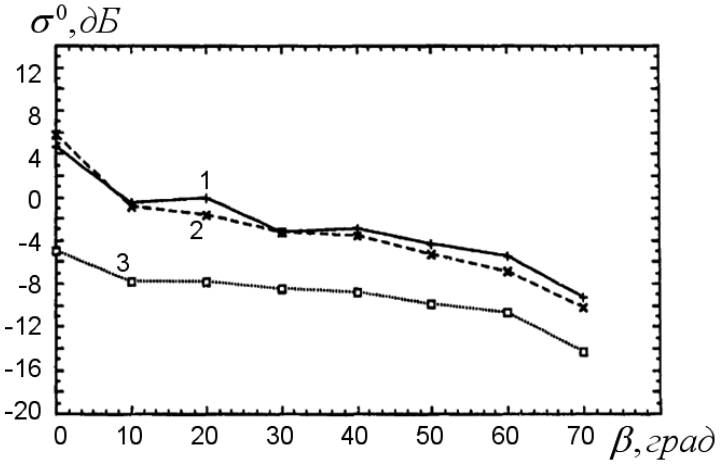


Рис. 17. Частота 94 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 – КП. Фон – гравий [9]

В диапазоне 94 ГГц неровности поверхности проявляются сильнее, чем в диапазоне 35 ГГц даже для асфальтовых и бетонных поверхностей. В работе [11] представлены обширные данные по результатам измерений характеристик радиолокационного отражения земных покровов в диапазоне излучения 95 ГГц.

На рисунке 20 представлены обобщенные по данным [15] динамические характеристики отражения. Максимальная и минимальная кривые соответствуют верхней и нижней границе, в пределах которых находятся значения удельной ЭПР для всех видов поверхностей, включая землю без растительности, сухой и влажный снежный покров, подстилающие поверхности с наличием кустарников и деревьев. Аналогичные кривые были построены для диапазона 35 ГГц (рисунок 21). Обозначения σ^0_{vv} и σ^0_{hv} соответствуют удельной ЭПР для вертикальной и кросс - поляризаций.

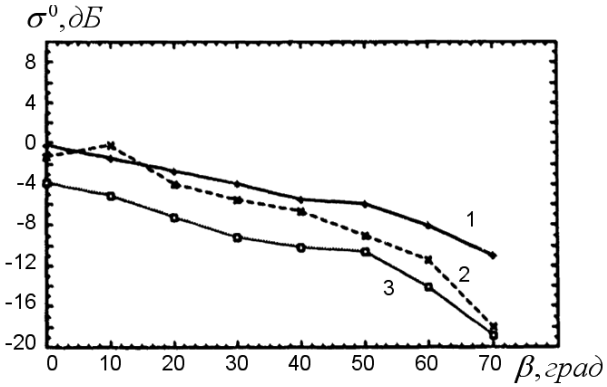


Рис. 18. Частота 94 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 – КП. Фон – сухой, гладкий асфальт [9]

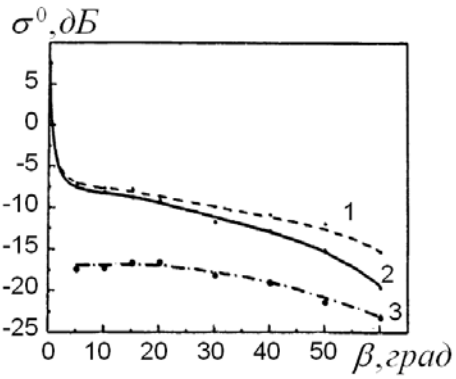


Рис. 19. Частота 35 ГГц; 1 – ВП; 2 – ГП; 3 - КП. Фон – асфальт [9]

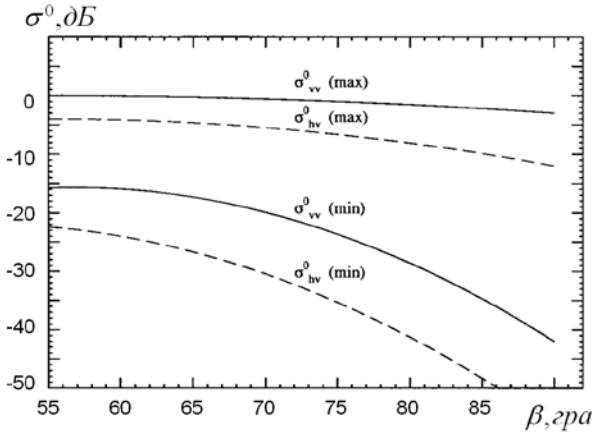


Рис. 20. Динамический диапазон изменения σ^0 для различных углов наблюдения β (94 ГГц) [15]

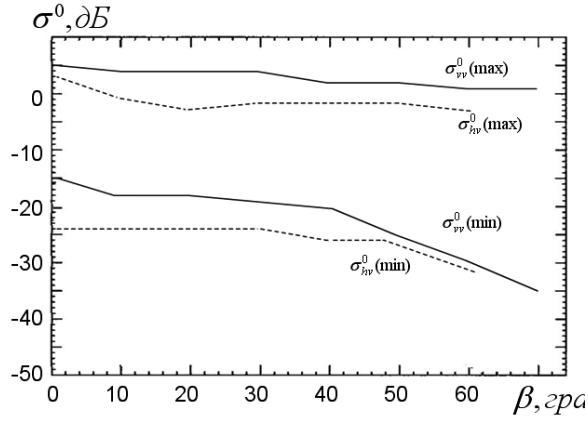


Рис. 21. Динамический диапазон изменения значения σ^0 для различных углов наблюдения β (35 ГГц)

Приведенные на рисунках 20 и 21 обобщенные поляризационные характеристики отражения радиолокационного излучения в диапазонах частот 35 и 94 ГГц подтверждают зависимость коэффициента обратного отражения от угла наблюдения (при скользящих углах отражение минимально). Значение удельной ЭПР для кросс-составляющей значительно меньше УЭПР для вертикальной и горизонтальной поляризации.

Выводы:

1. Значения удельной ЭПР лесных и примыкающих к ним покровов в диапазонах частот излучения 35 ГГц и 94 ГГц меняются в широких пределах в зависимости от условий наблюдения.

2. Для гладких подстилающих поверхностей характерна зависимость сигнала от вида поляризации облучающей волны и быстрое уменьшение отраженного сигнала с увеличением угла наблюдения, поскольку значительная часть энергии отражается зеркально. Только незначительная часть зондирующего излучения рассеивается в обратном направлении (диффузная составляющая) и принимается антенной. Для неровных поверхностей

величина удельной ЭПР практически не зависит от вида поляризации и слабо зависит от угла наблюдения.

3. При зондировании подстилающих поверхностей в миллиметровом диапазоне волн значения ЭПР на вертикальной и горизонтальной поляризациях практически равны и заметно превышают значения ЭПР для кроссовой составляющей.

4. Приведенные в статье данные по поляризационным характеристикам радиолокационного отражения лесных и прилегающих к ним покровов в миллиметровом диапазоне длин волн могут быть использованы при создании базы данных характеристик радиолокационного отражения земных покровов, при сопоставлении результатов экспериментальных исследований, картографировании лесных массивов и прилегающих к ним территорий.

Список литературы

1. Акиншин Н.С., Быстров Р.П., Румянцев В.Л., Соколов А.В. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения негауссовских сигналов. М.: Радиотехника, 2010. 528 с.

2. Вопросы перспективной радиолокации / под ред. А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. 512 с.

3. Саворский В.П. Вариации УЭПР L-диапазона, отражающие изменчивость лесотаксационных характеристик лесных территорий/ В.П.Саворский [и др.] // Материалы V Всероссийской научной конференции «II Всероссийские Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». 2012. С. 242–246.

4. Иванов В.К. Методы многочастотного радиолокационного дистанционного зондирования лесов/ В.К. Иванов [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. №7.

5. Neumann M. Assessing Performance of L- and P-Band Polarimetric Interferometric SAR Data in Estimating Boreal Forest Above-Ground Biomass/ M. Neumann [et all]//GeoRS(50), March 2012. No. 3. P. 714–726.

6. Алексеев А.Г., Штагер Е.А., Козырев С.В. Физические основы технологии Stealth: монография. СПб.: ВВМ, 2005. 284 с.

7. Кулёмин Г.П., Рассказовский В.Б. Рассеяние миллиметровых волн поверхностью земли под малыми углами. Киев: Наукова Думка,1987. 232 с.

8. Андрющенко М.С. База данных радиолокационных характеристик наземных покровов: свидетельство о государственной регистрации базы данных Рос. Федерация № 2012620670 / М. С. Андрющенко, Е. А. Штагер, Е. С. Яковлева; заявитель и патентообладатель ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт им. А. Н. Крылова». Заявка № 2012620229 от 02.04.2012; зарегистр. в Реестре баз данных 13.07.2012.

9. Haddock T.F., Ulaby F.T. Millimeter - Wave Radar Scattering From Terrain: Data Handbook / Technical Report 026247-1-T. The University Of Michigan, January, 1990. P. 133.

10. H. Schimpf, H. Essen, S. Boehmsdorff, T. Brehm. MEMPHIS – a Fully Polarimetric Experimental Radar / Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. P.1714–1716.

11. Bennett J.G., Evans R., Jones J. Modeling Backgrounds for the Prediction of the Radar Signature of Ground Vehicles / U.S. Army Tank-automotive and Armaments Command, Warren, MI 84397-5000, 3 March 2000. P.11.

12. Ulaby F.T. and others. Millimeter wave measurement and modeling of terrain scattering. Final report/U.S. Army Research Office / Contract DAAL-03-89-K-0056. February 1992.

13. Strozzi T., Mätzler C. Polarimetric Backscattering Measurements of Alpine Snowcover at 5.3 and 35 GHz / Submitted to IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. April 1996.

14. Gatesman A.J., Goyettea T.M., Dickinsona J.C., Gilesa R.H., Waldman J., Sizemoreb J., Chaseb R.M., Nixon W.E. Polarimetric Backscattering Behavior of Ground Clutter at X, Ka, and W-band. [Electronic resource] URL: http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA462978 (дата обращения: 10.05.2024).

15. Ulaby F.T., Nashashibi A., El-Rouby A, Li E.S., De Roo R.D., Sarabandi K., Wellman R.J, Wallace H.B.// 95-GHz Scattering by Terrain at Near-Grazing Incidence. IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Vol. 46, No. 1. January 1998.

16. Антенные системы беспилотных летательных аппаратов / М.С. Андрющенко, А.М. Голик, С.А. Сахнов, С.Н. Терешин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 230-236. DOI 10.24412/2071-6168-2024-5-230-231. EDN GJODDY.

17. Андрющенко М.С. Применение радиолокационных станций на борту беспилотных летательных аппаратов / М.С. Андрющенко, С.А. Сахнов, С.Н. Терешин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 217-223. DOI 10.24412/2071-6168-2024-7-217-218. EDN DVXBRE.

18. Андрющенко М.С. Радиолокационные характеристики беспилотных летательных аппаратов мультикоптерного типа, представляющих угрозу объектам охраны войск национальной гвардии Российской Федерации / М. С. Андрющенко, А. М. Голик, С. А. Сахнов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 7-8(181-182). С. 44-49. DOI 10.53816/23061456_2023_7-8_44. EDN WSHNNA.

19. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621579 Российская Федерация. Радиолокационная заметность беспилотных летательных аппаратов: № 2023621319: заявл. 11.05.2023: опубл. 18.05.2023 / С.А. Сахнов, М.С. Андрющенко, А.М. Голик; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский военный ордена Жукова институт войск национальной гвардии Российской Федерации». EDN SWVHHN.

Андрющенко Михаил Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, 125msa@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военной ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации,

Степанов Виктор Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Россия, Санкт-Петербург, АО «ВНИИ Трансмаш»

POLARIZATION CHARACTERISTICS OF RADAR REFLECTION OF FORESTS AND ADJACENT COVERINGS IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

M.S. Andryushchenko, A.M. Golik

The article presents an analysis of the results of domestic and foreign studies of the polarization characteristics of radar reflection of forests and adjacent covers. The dependences of the specific effective scattering area of the underlying backgrounds on the observation angle are given for vertical, horizontal and cross-polarizations of the sounding signal in the frequency ranges of 35 and 94 GHz for coniferous, deciduous forests, and shrubs. Arable land, ground covered with grass, asphalt and concrete roads were considered as adjacent covers. Based on the results of generalizing the data, curves were constructed that describe the dependence of the dynamic range of changes in the polarization characteristics of reflection on the viewing angle.

Key words: radar, millimeter wavelength range, remote sensing, effective scattering area, sounding signal, radiation polarization.

Andryushchenko Mikhail Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, 125msa@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Order of Zhukov Academy of the National Guard of the Russian Federation,

Stepanov Viktor Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Saint Petersburg, VNII Transmash JSC

УДК 556.535.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-323-324

АЛГОРИТМ IFDE0 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЛЬДИНЫ ВО ВРЕМЯ ЛЕДОХОДА

А.П. Зверев, В.В. Кузьмин, А.И. Карнюшкин

В статье рассмотрен вопрос движения льдин во время ледохода, по реке, при этом показано какие последствия ждут тот край или область если не производить контроль движения льдин по руслам рек, а также приведены формулы для определения времени начала ледохода и приведен показатель, который определяет вскрытие реки, затем предложен алгоритм IFDE0, который и рассматривает задачу почему же необходимо контролировать ледоход, а также предложены поплавки, которые позволят определять размеры льдины и примерную их массу и приведена программа на языке СИ++ посредством которой возможно предотвратить столкновение льдин с опорами моста.

Ключевые слова: ледоход, опоры моста, время вскрытия реки, программа на языке СИ++, алгоритм расчета движение льдин, поплавки.

В Российской Федерации каждый год фиксируются ЧС, связанные с ледоставом. Так всего на их долю с 2007 по 2024 год пришлось порядка 38 данных ситуаций. Эти гидрологические явления были основной причиной введения режима ЧС Федерального масштаба.

Рассмотрим паводки более подробно. Так в 2013 году в Якутии, Амурской области, Хабаровском и Приморском краях из – за образовавшегося таяния льда, а также выпавших осадков произошло значительное увлажнение практически всего водоразбора рек, в результате весеннего половодья оказались подтоплены 366 населенных пунктов, а также 1367 жилых домов. Естественно был введен режим ЧС Федерального уровня. При ликвидации последствий ЧС погиб один военнослужащий. Общий ущерб составил более 39 млрд. рублей.

На следующий год, уже в 2014 году так же в мае после вскрытия рек и дополнительных дождей привели к сильнейшему паводку в Алтайском крае и Хакасии. По данным МЧС было подтоплено свыше 20 тыс. домов. Погибло 7 человек местных жителей. Было повреждено водой более 51-го моста, 237 км. автодорог. Общий ущерб составил более 15 млрд. рублей. В целом ущерб от данного ЧС только Алтайскому краю превысил 5 млрд. рублей.

В 2016 году в городе Ишим (Тюменская область) в апреле месяце, произошло также гидрологическое ЧС, которая как показывает статистика было самым значительным за последние 40 лет. Погибших не было, однако ущерб составил порядка 3,8 млрд. рублей.

В 2019 году аналогичная ситуация произошла в Иркутской области из – за таяния снега в горах Восточных Саян поднялась вода в реке Ия и оказался подтопленным город Тулун. Ущерб от данной ЧС составил 35,145 млрд. руб.

В 2021 году режим ЧС был введен на Дальнем Востоке из – за подтопления в Забайкальском и Хабаровском крае, Амурской области и Еврейской автономной области. Ущерб здесь от стихии составил порядка 4,7 млрд. рублей.

В 2023 году губернатор Приморья Олег Кожемяко ввел на территории края режим ЧС из – за паводка. Общий ущерб оценивался прядка 10 млрд. рублей.

В 2024 году весной паводковая активность стала особым объектом внимания властей в Оренбургской, Курганской, Тюменской, Томской и Самарской областей. Общий ущерб от разгула стихии составил порядка 50 млрд. рублей [1,2,4].

Далее стоит рассмотреть ситуацию с подтоплением в Европе, есть ли они там или же их нет.

Так в конце сентября 2024 года из – за резких похолоданий температура изменилась в диапазоне 15 – 20^0 С в Альпах, в результате произошло выпадение осадков в виде снега и образования льда и далее произошедшее потепление двинуло массы воды в страны Европы. Приведем некоторые цифры по данным статистики 31 октября 2024 г. В результате наводнения на востоке Испании, а именно в Валенсии число погибших достигло 92 человека. В остальных странах, а именно Польша, Чехия, Германия, Франция, Румыния, Австрия и др. число погибших было более 25 человек. Общий ущерб от данной стихии составил несколько десятков миллиардов евро[1,3,10,11].

Таким образом, стоит подчеркнуть, что время ледохода присуще не только России, но и всем странах, в которых имеются водные артерии. Далее стоит рассмотреть вопрос, а возможно ли каким - то образом рассмотреть с одной стороны начала ледохода, а с другой стороны возможность спасти опоры мостов, так как в приведенных данных было показано, их количество было снесено более 51 шт.

Основная часть. В период весеннего снеготаяния приток талой воды в реке будет способствовать подъему уровня реки и как результат увеличения скорости течения реки. Увеличение солнечной активности и радиации и соответственно теплообмена с водой в реке будет способствовать уменьшению толщины льда и соответственно его прочности. Далее будет происходить уже разделение ледяного покрова на отдельные поля, которые формируются по трещинам льда. На крутых поворотах и в узких местах возникают торосы, надвиги и т.д. однако они могут находиться в таком состоянии довольно значительное время, пока будет не определена общая дата начала ледохода. Как правило за дату начала ледохода принимают дату вскрытия данного участка реки. Основные условия возникновения подвижек льда были определены авторами в [5,6,7,8].

В качестве основного и главного условия стоит отметить, отделение льда от берега (берегового или припайного льда) при повышении уровня над максимальным зимним не менее чем на

$$\Delta H \geq H - (H_з + h_л) \qquad (1)$$

где $H-$ уровень воды при вскрытии, $H_з-$ максимальный уровень зимний, $h_л-$ толщина льда.

Основной силой, создающей в ледяном покрове напряжение, которое приводит к вскрытию реки является сила потока[1,2,5,6,8].

Рассматривая более подробно возникающее напряжения на поверхности, так и в глубине как на сжатие, так и на изгиб статистика подтвердила, что второе условие может быть выражено неравенством следующего вида

$$Rh_з \leq f\ (\Delta H, H) \tag{2}$$

где R- разрушающе напряжение на изгиб, для тающего льда.

Практические расчеты показывают, что целесообразнее производить расчеты относительно разрушающего льда на изгиб φ . Ввиду того, что разрушающее напряжение необлученного ледяного покрова R принимается величиной постоянной(для какого то выбранного участка реки), с учетом ранее сказанного для главного условия весеннего ледохода выражение может быть записано в следующем виде [4, 8,9,12].

$$\varphi h_з \leq f\ (\Delta H, H) \tag{4}$$

В данном неравенстве уровень воды $H-$ будет показывать силу потока, обеспечивающего уровень подъема воды. $\Delta H-$ степень свободы движения полосы льда, отделяемой от берегов. В качестве замечаний стоит отметить, что для каждого отдельного участка реки данная зависимость будет различна, с особенностью свойственных ему гидравлических условий и особенностей русла реки. Но общий подход к получению таких зависимостей единый[1,4,13,14,15,16]. Условия же (4) можно рассматривать как общую модель вскрытия рек. Далее стоит остановиться на прогнозах моделей вскрытия рек. Как показывает практика критическое соотношение характеристик прочности льда и соответственно движения льдин для каждого участка реки из года в год будет меняться. Согласно статистики большая прочность льда к моменту вскрытия требует большой влекущей силы потока. Данная зависимость выражается графиками зависимости, полученными на основе наблюдений[1,3,8,10,17,18]. Для одних рек и извилин она будет одна для других она может быть и как правило отличаться. Однако для построения графиков учитывается всегда показатель водности реки. Его можно выразить следующей формулой $\varphi h-$ получаются на основе вскрытия реки,

$$\varphi h \leq 0{,}8(\frac{\Delta H_м}{100})^2 + 1{,}2 \tag{5}$$

$\Delta H_м$ - уровень подъема реки над максимальным значением.

Также стоит отметить, что встречается вариант, когда реки вскрываются раньше срока. Данный показатель характерен для рек, когда воды будут покрывать лед раньше времени, в случае интенсивного таяния снега и резкого повышения температуры.

В данном случае условия для вскрытия реки должны быть следующие:

$$\varphi h \leq \mathrm{c} \tag{6}$$

где с – некоторая постоянная величина.

Такого рода зависимости устанавливаются эмпирически на основании многолетних наблюдений и соотношения талой воды в момент вскрытия. К примеру, для реки Припять и Мозырь величина с принимается равным порядка 2,7 [3,4,8,9,10].

Расчет по не равенству (4) можно использовать и при рассмотрении методики прогноза вскрытия участков рек, находящихся в особых условиях, например, рек, которые в верховьях практически не замерзают. Как правило в данных случаях констатируют, что в поймах этих рек практически отсутствует ледоход или его значение не велико[18,19,20].

Далее стоит остановиться на методике прогноза сроков вскрытия рек по обобщенной зависимости. Потребность в обобщении зависимостей для расчета и прогноза весьма велика виду того, что разработка требует:

а) наличие многолетних рядов наблюдения

б) выполнение расчетов для определения прочностных характеристик текущего состояния льда к моменту вскрытия и др.

Ученым Булатовым К.М. предложено неравенство, выражающее условия вскрытия реки [1,3,4,16,17]

$$\frac{\varphi h_в}{\overline{\varphi h_в}} \leq f(Q_в/\overline{Q_в}) \qquad (7)$$

где Q – расход воды при вскрытии, $\overline{Q_в}$ – средний многолетний расход воды в данный момент. $\varphi h_в$ – относительная прочность льда на дату вскрытия, $\overline{\varphi h_в}$ – среднее многолетнее значение той же характеристики прочности льда в день вскрытия.

Правая часть неравенства является модульным коэффициентом расхода воды при вскрытии, а левая часть также является модульным коэффициентом прочности льда.

Данную формулу целесообразно применять для контроля вскрытия малоизученных рек или же тех участков рек, русла и уступы которых мало изучены.

Далее стоит остановиться на рассмотрении прогнозов вскрытия рек в средние сроки. Данный вид прогнозов делается как правило заблаговременно от 6 – 15 суток, в редком исключении до 20 суток.[1,3,18]

Общий подход к решению задачи позволяет отыскать возможности экстраполяции процессов уменьшения прочности льда и соответственно весеннего подъема для определения оптимального отыскания прогноза. Статистические данные показали, что продолжительность периода от схода снега до вскрытия реки составляет примерно 10 – 12 суток [11,3,4,9,10,18,19]. Повышение температуры в течении 5-6 дней для рек уже принимает необратимый характер. Следовательно, говорят уже о том, что вскрытие будет однозначно. Стоит отметить, что ежедневно строится номограмма по прочности льда и соответственно по водности реки. Возникает естественный вопрос, а какова же точность предложенного прогноза. Точность прогноза по данной методике характеризуется среднеквадратической погрешностью составляет менее допустимой. Однако проведенные исследования показали, что данную методику целесообразно рассматривать для рек с бассейном более 10 тыс. км^2 .

Вместе с этим стоит отметить, что данный прогноз может и не выполняться только в том случае, если произойдет резкое повышение средне суточной температуры воздуха.

На основе ранее сказанного стоит остановиться на алгоритме IFDE0 о порядке работы системы с целью недопущения ударов льда на опору моста. Как известно после вскрытия льдины могут достигать различных размеров от самых незначительных до больших. Таким образом, получается, что льдины могут ударять в опору моста и тогда его срок службы резко уменьшиться. С целью недопущения ударов предлагается создать систему, которая будет предотвращать удары льдин путем поворота платформы их в одну из сторон на угол от 10 до 45^0. Следовательно, они будут проходить рядом с опорой моста. Одним из вариантов решения данной задачи заключается в том, если на расстоянии 50 – 75 метров установить поплавки(маячки). Особенность поплавков(маячков) состоит в том, что они должны быть скошены с одной стороны, чтобы льдина различной толщины была бы способна наезжать на поплавок. Внутри поплавка должен быть датчик уровня, который и будет определять глубину(толщину) льдины. Количество поплавков(маячков) для каждой реки определяется самостоятельно в зависимости от ширины реки и примерной толщины льда. Далее данные будут передаваться в систему управления, которая будет принимать решение об угле поворота платформы установленной на опоре моста.

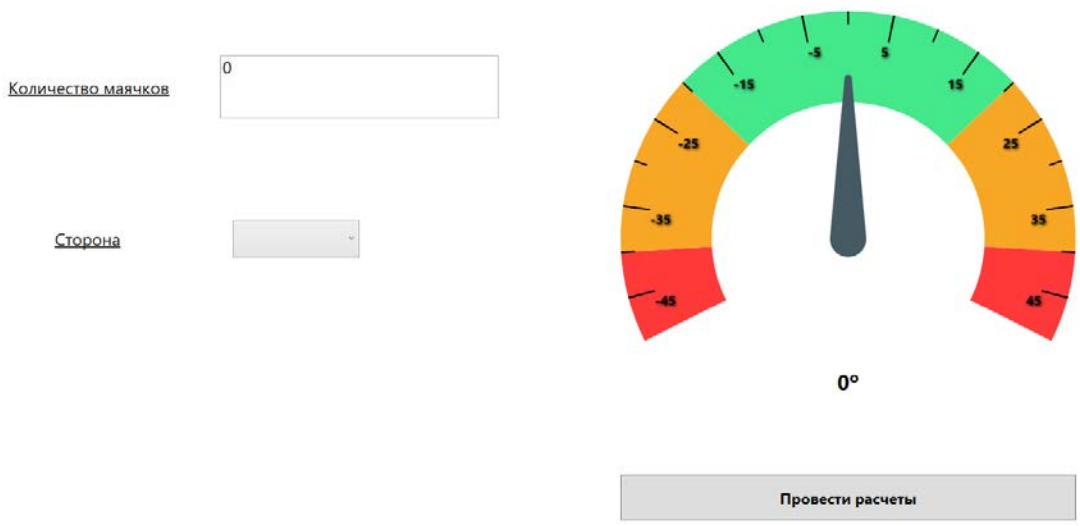


Рис. 1. Программа расчета движения льдин через опору моста.

Чем меньше льдина, тем меньше поплавков(маячков) будет наезжать на льдину. Поплавки(маячки) покажут ее размер и соответственно будет определен уровень, на который должна будет повернуться платформа прикрепленная к опоре моста. При этом нужно заметить, что при подходе льдины к опоре моста левая или правая часть прохода льдины будет определяться по показателям поплавков(моячков). Предполагается, что система должна работать в автоматическом режиме с одной стороны, а с другой стороны она позволит контролировать не только дату вскрытия реки, но

и максимальную толщину льда, которая будет присуща данному региону и реке соответственно. Алгоритм данной программы реализован на языке СИ ++ . В программе поплавки названы маячками.

Алгоритм работы IFDE0.

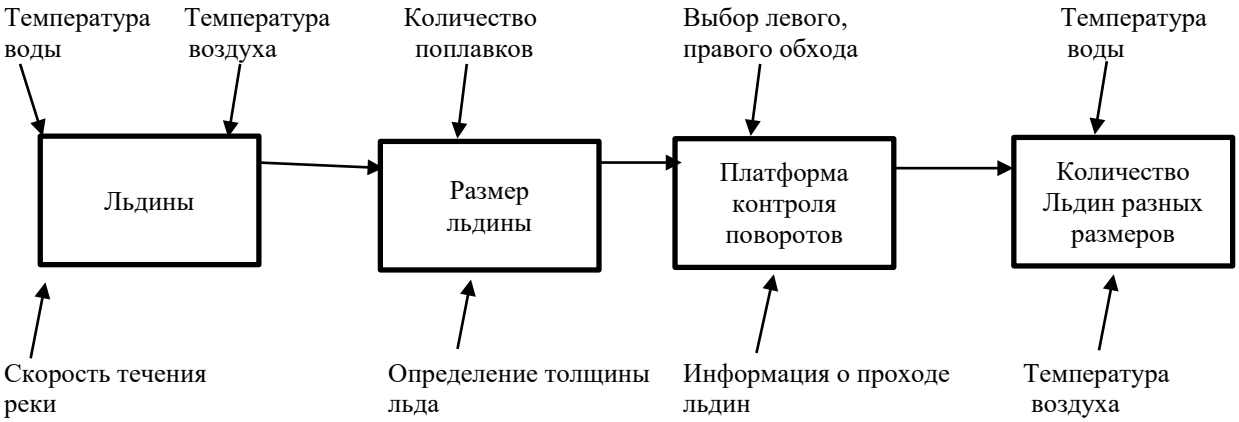


Рис. 2. Алгоритм IFDE0 ледохода по реке

Заключение. Таким образом предложенный алгоритм позволит: а) контролировать и составлять графики вскрытия реки на которой произошел ледоход, б) составлять графики контроля ежегодного вскрытия реки, в) определять количество льдин малого и среднего размера, при ледоходе г) составлять графики начала судоходства,

Список литературы

1. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ,2008 408 с.

2 Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода // Гидрометеорология и экология. 2020 № 61 С. 446–459. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-61-446-459.459 (in Russian). DOI: 10.33933/2074-2762-2020-61-446-459.

3 Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометиздат, 1987 246 с.

4 Агафонова С.А., Фролова Н.Л., Василенко А.Н., Широкова В.А. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках арктической зоны европейской территории России // Вестник Московского университета. Серия 5 География. 2016 № 6 С. 41–49.

5 Вуглинский В.С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле.2014 № 3 С. 32–35.

6.Sumachev A.E., Kuzmin V.A., Borodin E.S. River flow forecasting using artificial neural networks // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Т. 9. №. 10. P. 706-714.

7. Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic impacts of thawing permafrost — a review // Vadose Zone Journal. 2016. No. 6 (15). 20 p. DOI: 10.2136/vzj2016.01.0010.

8. Каталог неблагоприятных и опасных гидрологических явлений на реках Республики Коми [Электронный ресурс]. URL: http://meteork.ru/kng.shtml (дата обращения:30.09.2024).

9. Бузин В.А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб.: ГГИ, 2015. 240 с.

10.Coleman K.A., Palmer M.J., Korosi J.B., Kokelj S.V., Jackson K., Hargan K.E. et al. Tracking the impacts of recent warming and thaw of permafrost peatlands on aquatic ecosystems: A multi-proxy approach using remote sensing and lake sediments // Boreal Environment Research. 2015. Vol. 20. Pp. 363–377. URL: http://hdl.handle.net/10138/228213. (дата обращения:30.09.2024).

11. Ekici A., Beer C., Hagemann S., Boike J., Langer M., Hauc C. Simulating high-latitude permafrost regions by the JSBACH terrestrial ecosystem model // Geoscientific Model Development. 2014. Vol. 7. P. 631–647. DOI: 10.5194/gmd-7-631-2014.

12. Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Прогнозирование гидрологических характеристик с использованием нейронных сетей. Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения иперспективы развития». СПб: ХИМИЗДАТ, 2019. С. 812-815.

13. Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Изменение климата и его влияние на ледовый режим рек Арктической зоны РФ // Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб: ХИМИЗДАТ, 2019. С. 816-819.

14. Банщикова Л.С., Сумачев А.Э. Зажоры льда на реке Нева //Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб: ХИМИЗДАТ, 2019. С. 95-98.

15. Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Условия формирования фаз ледового режима на примере рек Сухона и Мезень // Сборник материалов участников XVI Большого географического фестиваля, посвященного 200- летию со дня открытия Антарктиды русской экспедицией под руководством Фаддея Беллинсгаузена и Михаила Лазарева. Санкт-Петербург: Свое издательство, 2020. С. 183-186.

16. Банщикова Л.С., Банщиков А.А., Сумачев А.Э. Распространение зажоров и заторов льда на реке Варзуга // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В.В. Никонова.

17. Современные гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ: тезисы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского гидрометеорологического университета, Санкт-Петербург, 22–24 октября 2023 года. С. 422 - 425.

18. Банщикова Л.С., Сумачев А.Э. Вариация температуры воздуха холодного периода на Кольском полуострове как фактор изменения ледового режима // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 3. С. 397-05. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-397-405.

19. Wendler G., Gordon T., Stuefer M. On the precipitation and precipitation change in Alaska // Atmosphere. 2017. No. 8 (253). P. 1–10. DOI: 10.3390/atmos8120253.

20. Déry S.J., Stadnyk T.A., MacDonald M.K., Gauli-Sharma B. Recent trends and variability in river discharge across northern Canada // Hydrology and Earth System Science. 2016. Vol. 20. P. 4801–4818. DOI: 10.5194.

Зверев Алексей Петрович, канд. техн. наук, доцент, moizver62@mail.ru, Россия, Химки, Мытищинский научно-исследовательский институт радиоизмерительных приборов,

Кузьмин Владимир Вячеславович. доцент, 1376281@rambler.ru, Россия, Москва, Академия ГПС МЧС России,

Карнюшкин Александр Иванович, канд. техн. наук доцент, заведующий кафедрой, him_expert@mail.ru, Россия, Москва, Академия ГПС МЧС России

HE IFDE0 ALGORITHM, FOR DETERMINING THE SIZE OF AN ICE FLOE, DURING AN ICE BREAK

A.P. Zverev, Kuzmin V.V., Karnyushkin A.I.

The article considers the issue of the movement of ice floes during an ice drift along a river, while showing what consequences await that region or region if you do not control the movement of ice floes along riverbeds, as well as formulas for determining the start time of an ice drift and an indicator that determines the opening of the river, then the IFDE0 algorithm is proposed, which considers the problem. why is it necessary to control the ice flow, and floats have been proposed that will allow determining the size of ice floes and their approximate mass, and a C++ program is provided that can prevent ice floes from colliding with bridge supports.

Key words ice drift, bridge supports, river opening time, C++ program, algorithm for calculating the movement of ice floes, floats.

Zverev Alexey Petrovich, candidate of technical sciences, docent, moizver62@mail.ru, Russia, Khimki, Mytishchi Scientific Research Institute of Radio Measuring Devices,

Kuzmin Vladimir Vyacheslavovich, docent, 1376281@rambler.ru, Russia, Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia,

Karnyushkin Alexander Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, him_expert@mail.ru, Russia, Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia

УДК 519.23
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-331-332

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КАК ИНСТРУМЕНТ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕВОЗОК

С.С. Пригожаев, А.С. Кузьмин, А.А. Пыхалов

В статье рассмотрены вопросы анализа статистических данных, в том числе с применением методологии и инструментов менеджмента качества с целью осуществления системного подхода к анализу технических причин нарушения безопасности перевозок. Отражены статистические данные происшествий, связанных с безопасностью перевозок по нескольким видам транспорта. На примере пассажирской службы железнодорожного транспорта предложено применение инструментов менеджмента качества при планировании производственных процессов, влияющих на повышение безопасности и комфортности пассажирских перевозок. Для иллюстрации исходных данных при построении концепции создания математической модели с использованием статистики предложены к применению диаграммы Парето и Исикавы.

Ключевые слова: происшествие, статистика, менеджмент качества, пассажирский вагон, безопасность перевозок

Железнодорожный транспорт занимает лидирующую позицию в грузовых и пассажирских перевозках в границах Российской Федерации. В связи с геополитической обстановкой в южных регионах России, и, как следствие, закрытием аэропортов в приграничных регионах юга России, в 2022 году наблюдается рост пассажирооборота[1]. Так, по данным отчета ОАО «РЖД» за 2022 год, пассажирооборот составил 122,9 млрд пассажиров[1], что, по сравнению с аналогичным периодом прошлого года (АППГ), увеличилось на 18,8%. По перевозкам грузов в компании отметили снижение числа погрузок практически во всех структурных подразделениях (дорогах)[1]. Положительная динамика перевозок в 2022 году по сравнению с АППГ наблюдалась только в границах восточного полигона[1].

Целью исследования является анализ возможностей использования статистического подхода и инструментов менеджмента качества при системном анализе конструкции вагонов с позиции возникновения эксплуатационных отказов и причин нарушения безопасности и надежности при работе нетягового подвижного состава.

Для достижения вышеуказанной цели необходимо решить следующие задачи:

- Изучить методы статистической обработки данных.
- Проанализировать возможность использования системы менеджмента качества при обработке статистических данных и их системном анализе в службе вагонного хозяйства.

Рост числа перевозок влечет за собой увеличение количества единиц подвижного состава (ПС) и длину поезда в целом. Как результат, растет нагрузка на предприятия, занимающиеся обслуживанием и ремонтом ПС. В

связи с дефицитом кадров, наблюдаемым на предприятиях железнодорожного транспорта в последние 5-7 лет, качество и объемы работ, выполняемых при техническом обслуживании и ремонте подвижного состава, неукоснительно снижаются [2]. Система обслуживания нетягового ПС подразумевает постоянный контроль технического состояния во время следования путем периодического осмотра в соответствии с технологией осмотра вагона. Наиболее распространен осмотр вагона по 12 позициям (контрольным точкам по часто возникающим неисправностям)[3]. Данная технология не подразумевает системный подход при обследовании подвижного состава, а лишь является отработанной процедурой проверок без выявления причинно-следственных связей возникновения отказов деталей, узлов и агрегатов. Исследования в области материаловедения и конструкционных материалов показывают, что появление неисправности достаточно часто влечет за собой цепочку отказов других сложных сборных конструкций (в нашем случае вагона) или нередко появление неисправности показывает на нарушение работоспособности других, в том числе и не связанных напрямую, элементов конструкции.

По данным, представленным в открытых источниках Федеральной службы государственной статистики (Росстат), ситуация по происшествиям на различных видах транспорта относительно нестабильна[4]. Представим число погибших и пострадавших в результате транспортных происшествий за последние 10 лет (2012-2022 г.г.) в виде гистограммы с накоплением: (Рис. 1)

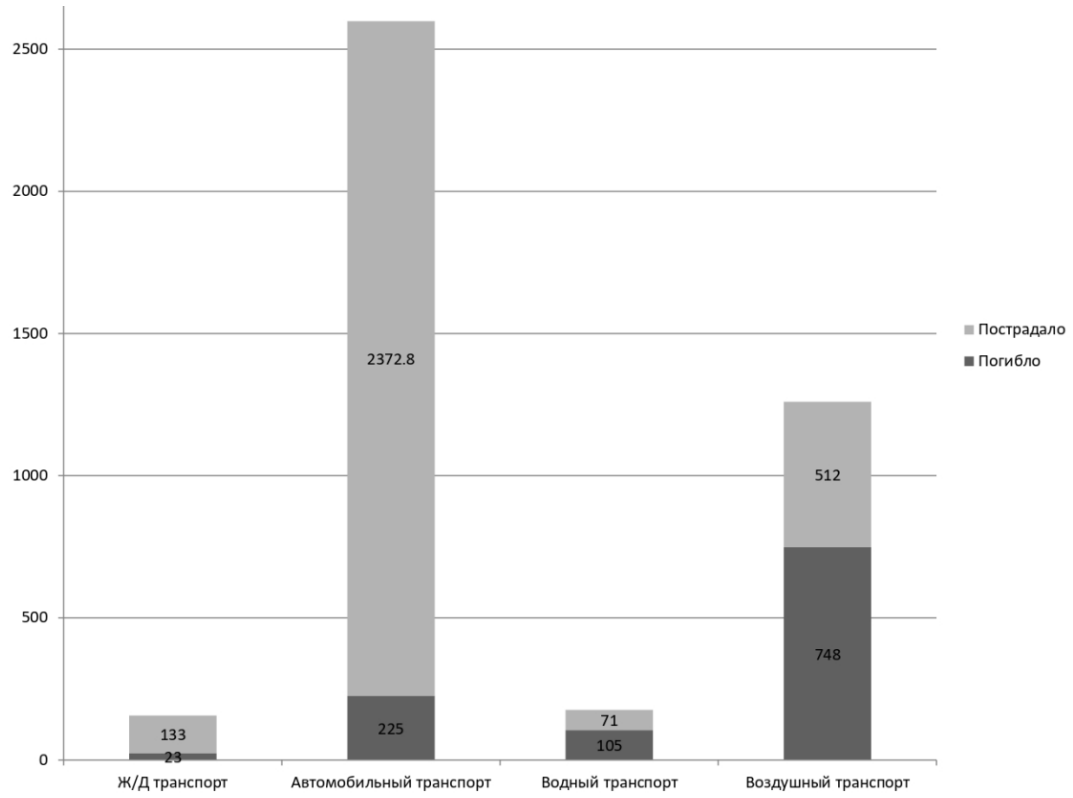


Рис. 1. Гистограмма статистические данные по погибшим и пострадавшим в происшествиях на транспорте

В вышепредставленной гистограмме приняты следующие допущения:

1. Данные по железнодорожному транспорту до 2013 года не учитывают происшествия не по вине ОАО «РЖД» (возникшие в результате действий третьих лиц), которые представлены Ространснадзором[4].

2. Данные по автомобильному транспорту представлены МВД России в тысячах человек[4].

3. Не учтены происшествия в новых регионах (Донецкая народная республика, Луганская народная республика, Запорожская и Херсонская области)[4].

4. Данные по водному транспорту представлены Ространснадзором: до 2014 года учитывались происшествия на море только с морскими судами, с 2014 - с морскими и судами смешанного плавания (река-море)[4].

Анализ гистограммы показывает, что за последние 10 лет наиболее опасным является автомобильный транспорт (225 тыс чел. погибло, 2372,8 тыс. чел. пострадало). При происшествиях на воздушном транспорте 748 человек погибло и 512 человек пострадало. На водном транспорте 105 человек погибло и 71 человек пострадал. Наименьшее число погибших наблюдается среди пассажиров железнодорожного транспорта (23 человека), при этом пострадавших 133 человека[4].

Исходя из вышеописанных данных, можно сделать вывод, что на железнодорожном транспорте вопросам безопасности пассажирских перевозок уделяется особое внимание. Наравне с повышением безопасности и усилением контроля за соблюдением нормативно-правовой базы, направленной на организацию безопасных перевозок, наблюдается постоянное совершенствование пассажирских вагонов в направлении повышения комфортности перевозок.

Например, инновационные вагоны производства Тверского вагоностроительного завода имеют измененную систему тормозов, предложены вагоны с беззазорным сцепным устройством, внедряется система многих единиц (СМЕ) в работе проводников[5]. Значительный прогресс достигается за счет изменения системы электроснабжения вагонов (наличие USB портов для зарядки гаджетов на каждом пассажирском месте), внедрение капсульной системы в вагонах некупейного типа (плацкартных), повышение пожарной безопасности, использование новых материалов во внутренней отделке кузова, использование светодиодного освещения, замена электрокипятильников с системой охлаждения питьевой воды на пурифайеры [6]. Большинство вагонов имеют систему кондиционирования воздуха и экологическичистые туалеты. Находят распространение двухэтажные вагоны не только купейной компоновки, но и специализированные вагоны- рестораны[7].

Немаловажным вопросом развития пассажирского подвижного состава является увеличение не только конструкционной, но и ходовой, технической и участковой скоростей движения. Это в первую очередь,

достигается внедрением тележек с повышенной плавностью хода. На высокоскоростных вагонах начинается использование тележек с адаптивными пневматическими системами гашения колебаний[8].

Увеличение скоростей движения в первую очередь сказывается на повышении ответственности работников, обслуживающих вагоны. Появляется потребность в изучении новых конструкций узлов и агрегатов, соблюдении требований безопасности движения поездов, эффективном использовании технических средств, сохранении окружающей среды и т.д.

Применяемая сегодня система планово-предупредительного ремонта[9] позволяет повысить показатели безопасности перевозки пассажиров и сохранности грузов. Обеспечение беспрекословного соблюдения сроков технического обслуживания и ремонта подвижного состава и предупреждения возникновения неисправностей в процессе работы должно быть основным направлением деятельности лиц, являющихся ответственными за техническое обслуживание и ремонт вагонов[9].

Принято считать, что статистика - это наука, изучающая количественные показатели различных явлений. Статистика, как наука, занимается сбором, обработкой, анализом и мониторингом различных численных показателей, как на государственном уровне, так и на уровне отдельно взятых предприятий[10].

Для систематизации знаний о возникновении неисправностей в ПС стоит отметить статистический многофакторный (системный) подход к исследованию вышеобозначенной проблемы.

Системный анализ - это метод исследования сложных систем, который позволяет изучить их структуру, функции, связи между элементами и взаимодействие с окружающей средой[11].

Системный анализ включает в себя несколько этапов:

1. Определение проблемы и целей анализа.
2. Сбор информации о системе и ее окружении.
3. Анализ данных и выявление основных характеристик системы.
4. Разработка моделей системы и ее взаимодействия с окружающей средой.
5. Оценка возможных решений задачи и выбор наиболее оптимального.
6. Реализация выбранного решения и контроль его эффективности.

Улучшение системы ремонта и обслуживания подвижного состава, а также дальнейшая модернизация конструкции вагона требует применение статистического подхода к анализу проблем, возникающих в процессе эксплуатации подвижного состава.

На железнодорожном транспорте (грузовые перевозки) с 2007 года внедрена комплексная автоматизированная система учета, контроля устранения отказов технических средств и анализа их надежности (КАСАНТ)[12]. Для пассажирских перевозок применяется автоматизированная система управления «Экспресс-3», подсистемой которой является

автоматизированная система управления парком пассажирских вагонов, включая его эксплуатацию (учет пробегов и использования) и ремонт (статистический учет неисправностей и проведенных плановых/неплановых ремонтов)- АСУ ПВ[12].

Вышеописанные программные комплексы используют классические методы обработки статистических данных и имеют возможность представления этих данных в графическом виде (графики и диаграммы).

К базовым методам обработки данных относятся инструменты математической статистики:

1. среднее арифметическое значение;
2. медиана;
3. мода;
4. линейное отклонение;
5. среднее линейное отклонение;
6. среднеквадратичное отклонение (стандартное отклонение);
7. дисперсия;
8. коэффициент вариации;
9. стандартная ошибка среднего.

Также следует отметить использование технологами и руководителями предприятий железнодорожного транспорта в своей работе большого количества графиков и диаграмм (столбчатых, линейчатых, круговых), которые предоставляет АСУ ПВ[12]. Применение графических методов обработки статистических данных позволяет наглядно отобразить числовые значения для более удобного восприятия.

Использование классических методов обработки статистических данных не дает возможности системного подхода к исследованию проблемы. Системный подход в обслуживании и ремонте подвижного состава должен подразумевать многофакторный подход при выявлении неисправностей и создании единой системы контроля узлов и агрегатов подвижного состава при выявлении определенных неисправностей.

Сегодня немногие предприятия проводят статистический анализ при помощи новых методов системы управления качеством. Работа в направлении управления качеством и использование методологии систем менеджмента качества позволяют провести углубленный анализ статистических данных с элементами систематизации и, как результат, получения множества решений наиболее важных проблем.

Рассмотрим системный подход к определению причин роста числа неисправностей на предприятии «Н». В данном примере все значения являются гипотетическими и используются исключительно для наглядного представления возможностей применения СМК при системном статистическом анализе. Известно, что подразделение этого предприятия занимается ремонтом и обслуживанием гидравлических демпферов пассажирских вагонов. Данные гасители используются предприятием для установки на собственный парк пассажирских вагонов. В 2022 году руководство предприятия запросило у начальника цеха и технолога данные по неисправностям

гидрогасителей за последние несколько лет, поскольку наблюдается рост расходов на запасные части, а равно и рост неисправностей.

Для определения роста числа неисправностей используем круговую диаграмму, применяемую при анализе за условные 2021 и 2022 годы (реальные данные могут быть выгружены из АСУ ПВ):

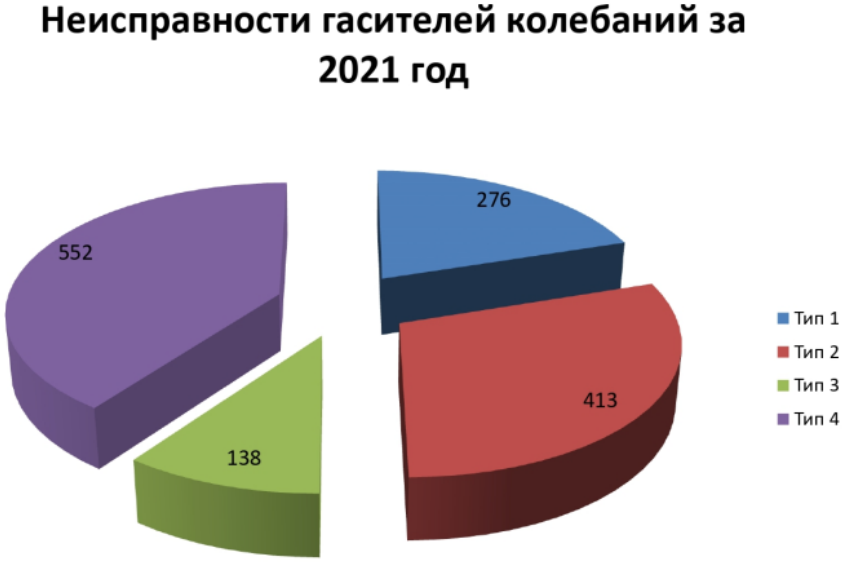


Рис. 2. Диаграмма количества неисправностей гасителей колебаний за 2021 год

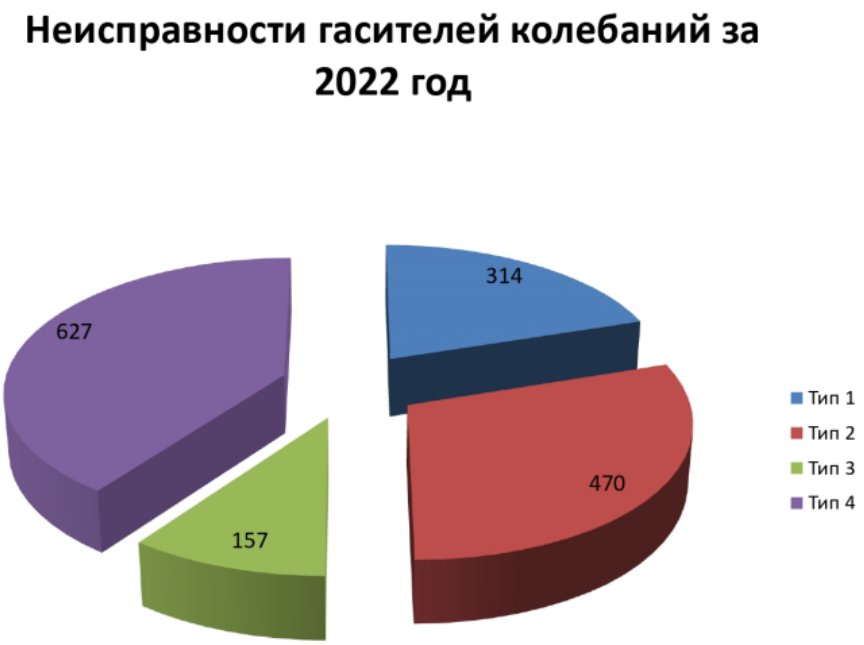


Рис. 3. Диаграмма числа неисправностей гасителей колебаний за 2022 год

При визуальном представлении распределения числа неисправностей, отмечается тенденция роста отказов гидравлических гасителей колебаний.

Исходя из вышепредставленных значений, появляется возможность предположения количественного состава запаса гасителей колебаний для оперативной замены неисправных и, соответственно, сокращения времени простоя вагона в ремонте.

Стоит отметить, что при техническом обслуживании и ремонте гидравлических гасителей колебаний разных моделей возникает необходимость переналадки технологического оборудования, что, в свою очередь, увеличивает технологическое время ремонта. Также необходимо понимать, что хранение запасных частей нередко осуществляется в отдельных помещениях, что также негативно складывается на времени ремонта.

Таким образом, с учетом системы организации и рационализации рабочего места (метод 5S) [13], рекомендуется производить крупноузловую замену неисправного гасителя колебаний на исправный, с последующим размещением снятого гасителя на накопительных стеллажах. При накоплении определенного количества гасителей колебаний производить их ремонт без переналадки технологического оборудования, и с возможностью получения запасных частей со склада сразу в больших объемах.

При накоплении неисправных гасителей колебаний появляется возможность систематизации информации с возможностью анализа причин возникновения неисправностей, а равно и статистический учет числа отказов. Анализ нескольких неисправных гасителей колебаний позволит использовать системный подход при установлении причинно-следственной связи, с наименьшей ошибкой на основе статистических показателей.

Для повышения качества производимых ремонтов данным предприятием и выявлению заводского брака необходимо активное применение различных методов системного анализа и менеджмента качества.

Системы менеджмента качества (СМК) - это инструменты и методы, используемые организациями для управления и контроля качества своих продуктов или услуг. Они обеспечивают единый подход к качеству на всех этапах производства, от проектирования до послепродажного обслуживания[14].

СМК обычно включают в себя процессы управления, такие как планирование, обеспечение, контроль и улучшение качества. Они также могут включать в себя стандарты, процедуры, инструкции, обучение персонала и другие меры, направленные на достижение и поддержание высокого уровня качества продукции или услуг.

С точки зрения СМК, наиболее оптимальным способом для работы со статистическими данными является применение закона Парето.

В качестве примера использования этого закона в вагонном хозяйстве проведем систематизацию поступивших в ремонт гасителей за 2021-2022 годы по видам неисправностей Систематизированные данные представим в виде таблицы

Распределение количества неисправностей гидравлических гасителей

№ п/п	Неисправности/тип гасителя	Тип.1	Тип.2	Тип.3	Тип.4
1.	Неисправность №1	275	21	15	288
2.	Неисправность №2	87	226	39	216
3.	Неисправность №3	95	51	-	185
4.	Неисправность №4	22	43	54	208
5.	Неисправность №5	12	-	32	84
6.	Неисправность №6	26	84	24	129
7.	Неисправность №7	73	14	-	63
8	Неисправность №8	-	259	28	6
9.	Неисправность №9	-	61	79	-
10.	Неисправность №10	-	124	24	-

Поскольку на круговой диаграмме видно, что число неисправных гасителей тип 4 достаточно велико, построим для этих гасителей диаграмму Парето. Для этого представим данные по видам неисправностей этих гасителей в виде столбчатой диаграммы, расположив их в порядке убывания.

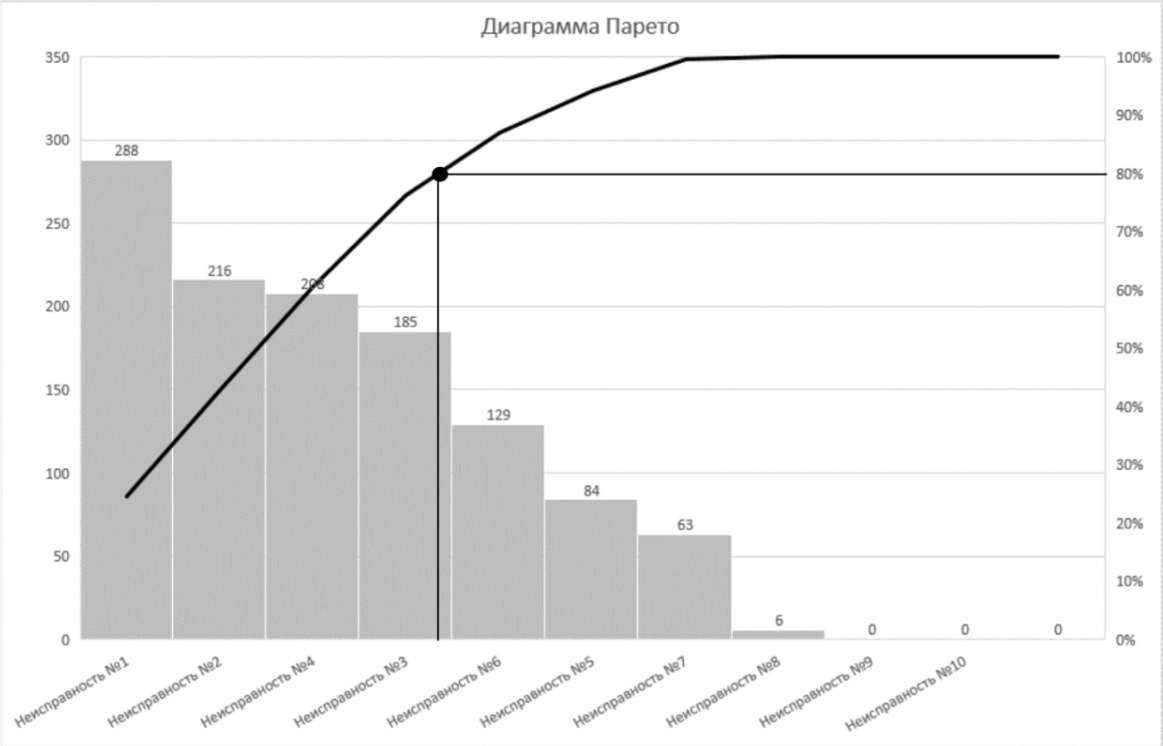


Рис. 4. Диаграмма Парето для представленного примера

Согласно закону Парето, 20% усилий дают 80% результата[15]. Стоит отметить, что для каждого отдельного случая значения могут быть разнообразными (80/20, 70/30 и т.д.). Для определения численных показателей неисправностей и вектора работы предприятия по улучшению ситуации необходим анализ построенной диаграммы с учетом особенностей деятельности и связанных с ней производственных параметров[15].

Исходя из диаграммы и закона Парето, можно сделать вывод, что для гасителя колебаний необходимо в первую очередь проводить анализ и установление причинно-следственных связей появления неисправностей №1,

№2, №4 и №3. Поскольку эти неисправности являются «главными», т.е. представляют 80% от общего числа неисправностей, то основной упор при работе с гасителями тип 4 необходимо давать именно на эти неисправности.

Таким образом, для наиболее качественного распределения сил и определения вектора дальнейшего усовершенствования конструкции или создания условий для сокращения числа этих неисправностей (смена поставщика запасных частей, установка дополнительного оборудования, изменение технологии ремонта, и т.д.), необходимо выявить причины возникновения неисправностей №№ 1, 2, 3,4.

Для определения причин возникновения неисправностей также следует применять инструменты менеджмента качества. В данном случае системный подход обеспечивает два базовых инструмента: «Рыбья кость» (Диаграмма Исикавы) или Правило пяти почему[16]. Стоит отметить, что оба инструмента предусматривают использование мозгового штурма.

Представим пример построения диаграммы Исикавы.

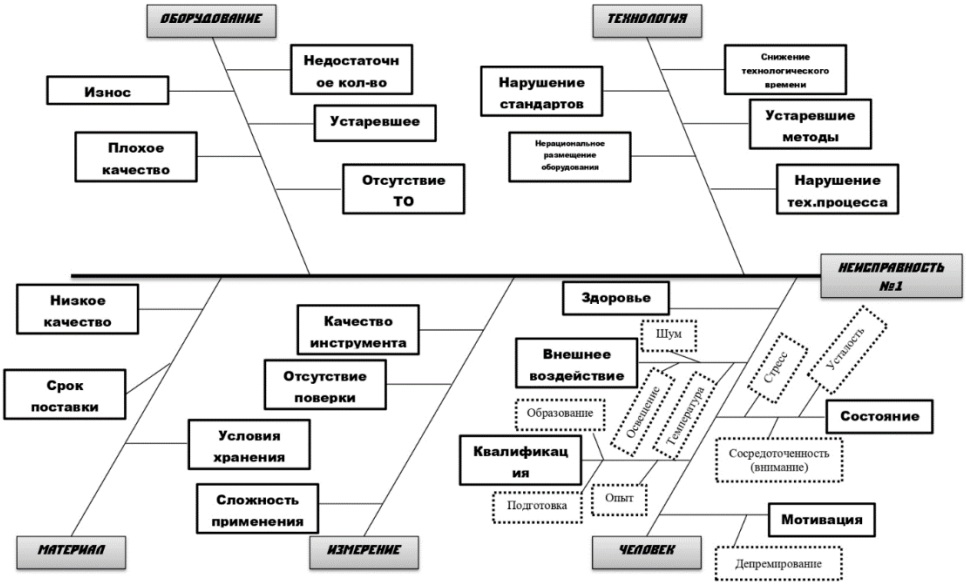


Рис. 5. Пример построения диаграммы Исикавы для определения факторов, влияющих на возникновение неисправности

Чтобы разобраться с проблемой, нужно выявить и устранить факторы, которые ее вызывают. Каору Исикава предлагает начинать с самых основных причин, то есть факторов самого низкого уровня или основополагающих причин проблемы [17]. Теоретик утверждает, что это предотвратит дальнейшие ошибки [17].

Поскольку работать одновременно со всеми причинами невозможно, изменения обычно внедряются поэтапно. Первоочередными изменениями будут те, которые возможно реализовать своими силами. Факторы ранжируются по степени важности. Анализ диаграммы Исикавы позволяет осуществить многофакторный системный подход к решению определенной проблемы. Таким образом, осуществляется принцип решения «от общего к частному» но, с использованием принципов системного анализа и СМК.

Выводы. Для повышения качества предоставляемых услуг в пассажирской службе железнодорожного транспорта, необходимо, внедряя различные усовершенствования конструкции подвижного состава, обращать внимание на значимость повышения комфортности, скорости движения и безопасности перевозок. Определение направлений модернизации зачастую продиктовано возникновением неисправностей. Устранение первоочередных проблем сегодня производится путем замены детали одного производителя на аналогичную деталь другого, при этом абсолютно отсутствует системный подход к анализу причинно-следственных связей.

При производстве анализа какой-либо сложной сборной конструкции возникает необходимость многофакторного исследования не только конструктивных особенностей, но и учет условий эксплуатации (условия нагружения, погодные условия, и т.д.). Одним из элементов системного анализа должен быть подробный контроль статистических данных, собранных в процессе эксплуатации. Только при системном подходе возможно учесть максимально допустимое количество факторов, влияющих на процесс эксплуатации сложных сборных конструкций, таких, как пассажирский вагон.

Обновление принципов работы со статистическими данными и использование наряду с ними методов бережливого производства и системы менеджмента качества, в свою очередь, может увеличить надежность конструкции, а равно и пассивную безопасность подвижного состава в целом. При внедрении СМК в анализ причин неисправностей может наблюдаться повышение продуктивности предприятия, а равно его рентабельность и интенсификация производственной деятельности.

Список литературы

1. Итоги работы ОАО «РЖД» в 2022 году превзошли ожидания // АО «Издательский дом «Гудок». [Электронный ресурс] URL: https://gudok.ru/news/util_avto/?ID=1627323 (дата обращения: 16.11.2023).

2. В. Максимов, А. Войцеховский Где взять людей для железных путей? Дефицит кадров на сети РЖД и в промышленности приобретает катастрофический характер // Сетевое издание «Вгудок», Интернет-портал о железнодорожном транспорте, логистике и перевозках. [Электронный ресурс] URL: https://vgudok.com/light/gde-vzyat-lyudey-dlya-zheleznyh-putey-deficit-kadrov-na-seti-rzhd-i-v-promyshlennosti (дата обращения: 13.11.2023).

3. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации № 808-2022 ПКБ ЦВ Утверждена Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества Протокол от 8 декабря 2022 г. № 77.

4. Официальная статистика происшествий с подвижным составом и пострадавшими в них // Росстат Федеральная служба статистики. [Электронный ресурс] URL: https://rosstat.gov.ru/statistics/transport (дата обращения: 01.12.2023).

5. Приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации № 3ЦЗ от 26.04.2001 г. (в действующей редакции от 29.01.2003 г.) «О совершенствовании организации труда бригад, занятых на обслуживании пассажирских поездов».

6. Парк Восточно-Сибирской железной дороги пополнили пассажирские вагоны нового поколения // ОАО «РЖД» [Электронный ресурс] URL: https://vszd.rzd.ru/ru/1900/page/104069?id=284045 (дата обращения: 05.01.2024).

7. ТМХ получил разрешение на производство нового двухэтажного вагона-ресторана // АО «Издательский дом «Гудок» [Электронный ресурс] URL: https://gudok.ru/news/?ID=1583956 (дата обращения: 28.12.2023).

8. Предложения пассажиров станут основой требований к новым вагонам // Вагоны и вагонное хозяйство. 2021. № 4(68). С. 8-10.

9. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены Приказом Минестерства транспорта Российской Федерации от 23.06.2022г. № 250.

10. Орлов А.И. Прикладная статистика - состояние и перспективы // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 119. С. 44-74.

11. Основы системного анализа / П. П. Карпенко, А. В. Селезнев, А. В. Пелогейко [и др.] // Столыпинский вестник. 2022. Т. 4, № 4.

12. Замышляев А.М. Прикладные информационные системы управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте. Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2013.143 с.

13. Методика организации и поддержания порядка на рабочих местах по системе 5С. Утверждена Распоряжением ОАО "РЖД" от 11.02.2021 № 267/р.

14. Пыхов С.И., Позднякова Ж.С. Управление качеством: уч. пос. Челябинск: ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет», 2021. 181 с.

15. Кох, Ричард. Жить по принципу 80/20 : практическое руководство / Ричард Кох. Москва: Эксмо, 2022. 256 с.

16. Павлова, А.С. Диаграмма Исикавы как метод анализа проблем компании // Вестник магистратуры. 2019. № 4-4(91). С. 41-43.

17. Исикава Каору. Японские методы управления качеством. Москва: «Экономика», 1988. 199 с.

Пригожаев Степан Сергеевич, аспирант, Stepri@yandex.ru, Россия, Иркутск, Иркутский государственный университет путей сообщения,

Кузьмин Александр Сергеевич, инженер-консультант СМК, alexandrkuzmin2016@yandex.ru, Россия, Иркутск, ООО «Научно-производственный экспертный центр АвтоГрад»,

Пыхалов Анатолий Александрович, д-р техн. наук, профессор, pykhalov_aa@mail.ru, Россия, Иркутск, Иркутский государственный университет путей сообщения

STATISTICAL DATA AS A TOOL FOR SYSTEM ANALYSIS OF RELIABILITY AND SAFETY OF TRANSPORTATION

S.S. Prigozhaev, A.S. Kuzmin, A.A. Pykhalov

The article discusses the issues of statistical data analysis, including using quality management methodology and tools in order to implement a systematic approach to analyzing the technical causes of transportation safety violations. The statistical data of accidents related to the safety of transportation by several modes of transport are reflected. Using the example of the passenger service of railway transport, the use of quality management tools in the planning of production processes that affect the improvement of safety and comfort of passenger transportation is proposed. To illustrate the initial data, when constructing the concept of creating a mathematical model using statistics, the Pareto and Ishikawa diagrams are proposed for use.

Key words: accident, statistics, quality management, passenger carriage, transportation safety.

Prigozhaev Stepan Sergeevich, postgraduate, Stepri@yandex.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk State University of Railway Transport,

Kuzmin Alexander Sergeevich, QMS consulting engineer, alexandrkuzmin2016@yandex.ru, Russia, Irkutsk, Scientific and Production Expert Center AutoGrad, LLC,

Pykhalov Anatoly Alexandrovich, doctor of technical sciences.sciences, professor, pykhalov_aa@mail.ru, Russia, Irkutsk,I rkutsk State University of Railway Transport

УДК 621.396
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-343-344

МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ РАДИОЧАСТОТНЫМ СПЕКТРОМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СРЕДСТВ И КОМПЛЕКСОВ РАДИОСВЯЗИ

Д.И. Коньков

В статье рассмотрен алгоритм распределения радиочастотного ресурса между абонентами радиосети с целью повышения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Представленная методика позволяет учесть особенности применяемых средств и комплексов радиосвязи, а также их взаимное влияние и условия распространения радиоволн.

Ключевые слова: сеть радиосвязи, электромагнитная совместимость, радиочастотный спектр, распределение и назначение частот, генетический алгоритм.

Развитие и внедрение новых средств и комплексов радиосвязи приводит к существенному усилению влияния непреднамеренных радиопомех, создаваемых радиоэлектронными средствами (РЭС). Данный факт выводит на передний план одну из сложных проблем современной радиоэлектроники – проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС. Согласно Межгосударственному стандарту [1] под электромагнитной совместимостью технических средств понимают способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.

Возрастающее влияние радиопомех от излучений РЭС на качество функционирования линий связи и радиоэлектронных систем различного назначения обусловливается рядом объективных причин [2]:

– прогрессирующий рост количества РЭС, используемых в различных областях человеческой деятельности, и, как следствие резкое увеличение территориальной плотности их размещения;

– ограниченность применяемого радиочастотного спектра;

– техническое несовершенство современных передающих, приемных и антенно-фидерных устройств;

– увеличение подъема значительного числа РЭС над поверхностью земли приводит к повышению дальности прямой видимости и росту количества действующих на них источников непреднамеренных помех.

Технические решения, направленные на совершенствование РЭС, облегчают решение задач по обеспечению ЭМС организационными мерами, которые направлены прежде всего на эффективное использование частотного, пространственного и временного ресурсов. Среди этих мер особое место занимает рациональное использование радиочастотного ресурса, так как оно, в большинстве случаев, является наиболее эффективным [2].

Управление радиочастотным спектром представляет собой достаточно сложный организационно-технический процесс, включающий в себя решение целого ряда разнообразных по своему характеру задач и требующий больших трудозатрат должностных лиц органов управления радиосвязью [3-7]. Таким образом, для качественного решения данной задачи необходимо создание автоматизированного аппарата частотного распределения.

Методика управления радиочастотным ресурсом. Обобщенный алгоритм распределения и назначения частот представлен в виде блок-схемы на рисунке 1.

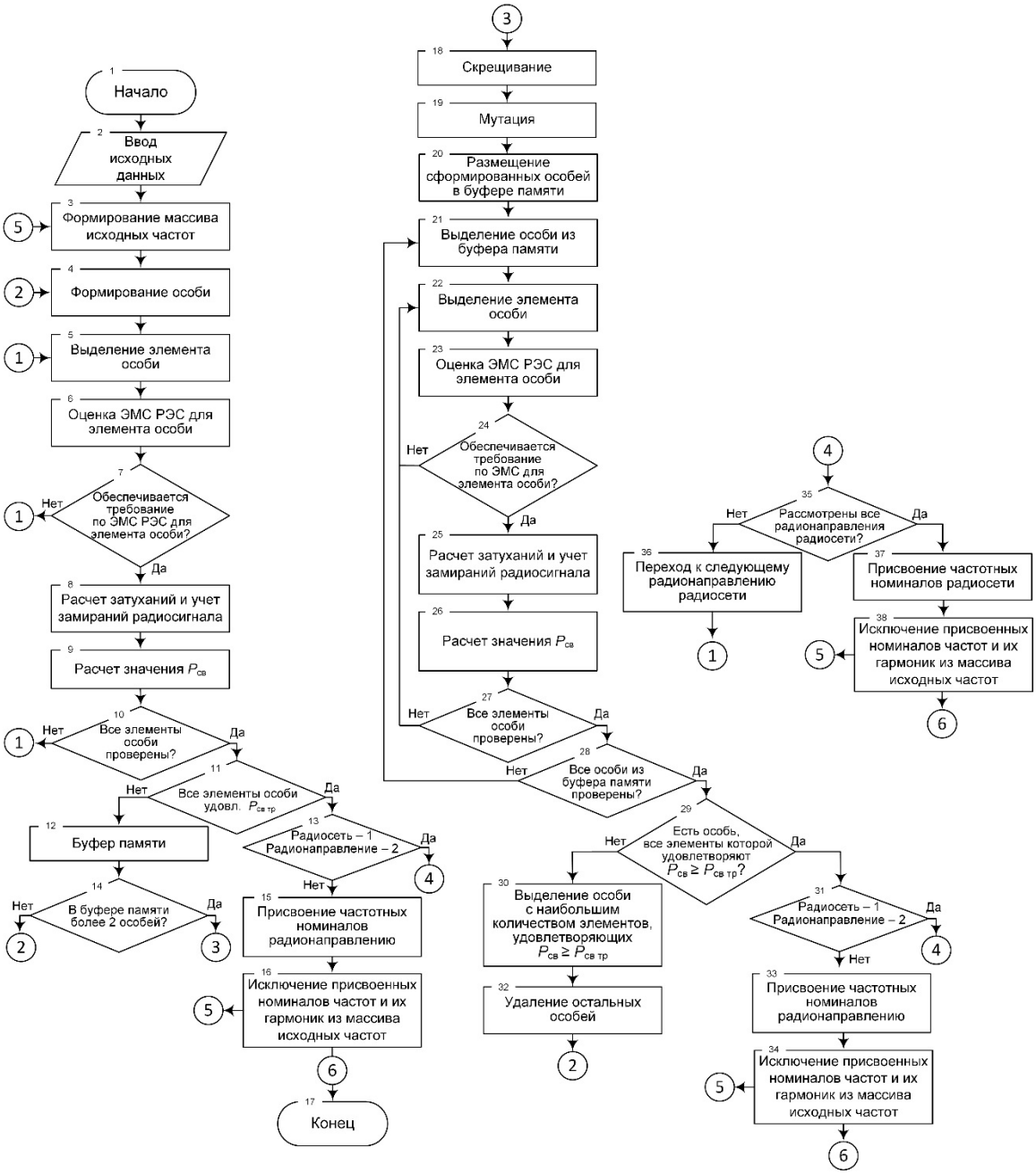


Рис. 1. Обобщенная блок-схема распределения и назначения частот

На первом этапе происходит ввод исходных данных, которые определяются в зависимости от технических характеристик радиоэлектронных средств, являющихся основой исследуемых радиосетей и их взаимного расположения на электронной карте местности. Далее, исходя из их полученных данных, происходит формирование массива исходных частот для конкретной, рассматриваемой сети радиосвязи, данный массив генерируется исходя из следующих параметров:

1) диапазона рабочих частот РЭС (Δf);

2) массива самопораженных частот РЭС ($f_{сп}$);

3) матрицы допустимых частотных расстроек, формируемой для каждого РЭС радиосети или радионаправления $||\Delta f_{допij}||$;

4) дополнительного ограничения используемого диапазона частот, связанного, например, с работой средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) или наличия запрещенных для использования номиналов частот.

По мере распределения, исходный частотный массив корректируется путем исключения из его состава номиналов уже присвоенных радиостанциям частот [8-9].

Следующим шагом происходит разделение алгоритма исходя из режима работы радиосети (радионаправления) (на фиксированной частоте или с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты).

В случае, когда рассматриваемая радиосеть (радионаправление) функционирует в режиме работы на фиксированной частоте, распределение частот осуществляется с использованием генетического алгоритма [10]. При данных условиях из исходного массива частот случайным образом формируется так называемая «особь» – некоторое количество номиналов (элементов или «генов»), из которых одна основная частота ($f_{осн}$) и n количество запасных (рисунок 2).



Рис. 2. Формирование особи

Следующим этапом для каждого из элементов особи производится проверка на соответствие требованиям по ЭМС.

Оценка ЭМС РЭС производится согласно блок-схеме на рисунке 3.

На вход алгоритма подаются номинал частоты, который предполагается назначить группе РЭС (f_i), и один из номиналов частот, уже назначенных для работы РЭС одной из соседних радиосетей (f_j). Далее определяется с какой конкретно ситуацией возникновения непреднамеренных помех предстоит иметь дело:

1. ($f_i = f_j$) – воздействие основного излучения по основному каналу, РЭС с номиналом f_j воспринимается как источник помехи. Мощность помехи на входе приемника рассчитывается как:

$$P_{\text{П вх прм}} = P_{\text{П}} + \eta_{\text{фП}} + G_{\text{П}} + F_{\text{П}}(\Theta, \varphi, f) + W_0 + W_{\text{Т}} + \\ + \xi_{\text{поляр}} + G + F(\Theta, \varphi, f) + \eta_{\text{ф}} + \xi_{\text{сопр}} \quad (1)$$

где: $P_{\text{П}}$ – мощность источника помехи; $\eta_{\text{фП}} / \eta_{\text{ф}}$ – КПД фидера антенны источника помехи/приемной антенны; $G_{\text{П}} / G$ – коэффициент усиления антенны источника помехи/приемной антенны; $F_{\text{П}}(\theta, \varphi, f) / F(\theta, \varphi, f)$ – квадрат нормированной характеристики направленности антенны источника помехи/приемной антенны; W_0 – потери сигнала в свободном пространстве; $W_{\text{Т}}$ – потере на трассе из-за влияния земной поверхности; $\xi_{\text{поляр}}$ – коэффициент согласования по поляризации; $\xi_{\text{сопр}}$ – коэффициент согласования по сопротивлению.

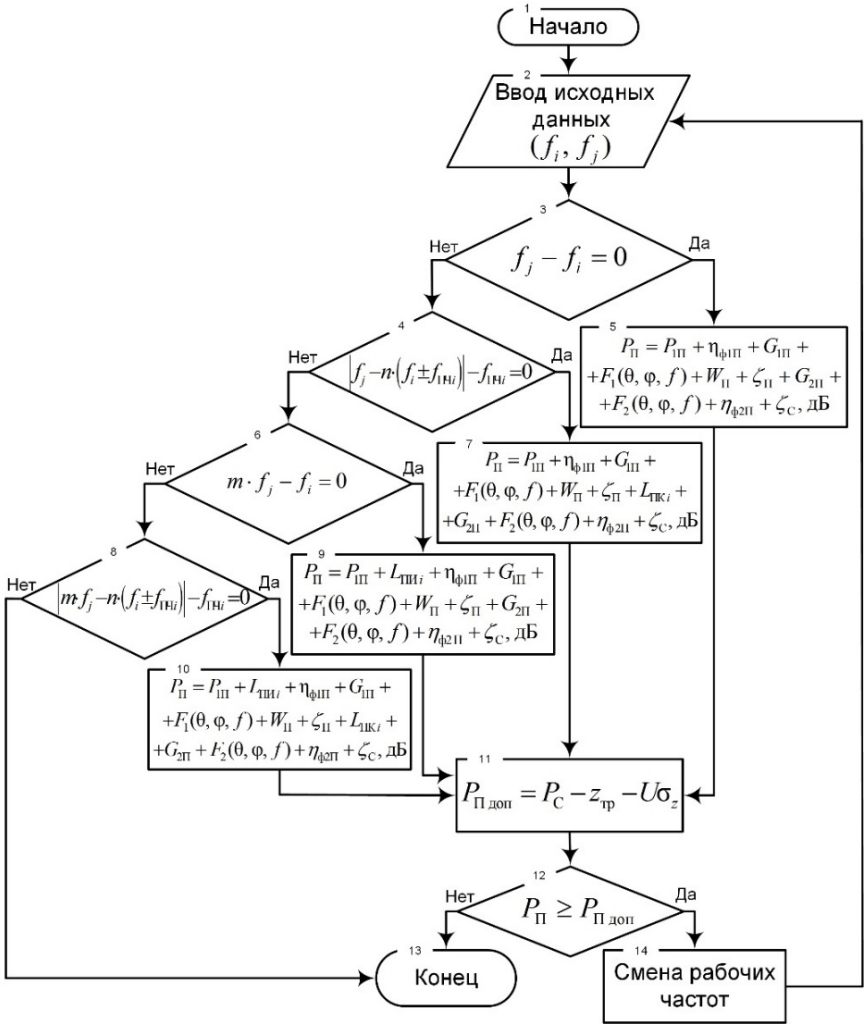


Рис. 3. Блок-схема оценки ЭМС РЭС

для последующих случаев, когда имеют место следующие ситуации:

2. воздействие основного излучения по побочному каналу ($|f_j - n(f_i \pm f_{\text{ПЧ}i})| - f_{\text{ПЧ}i} = 0$), где $f_{\text{ПЧ}\,i} = f_i - f_{\text{гет}}$, $n = 1, 2, \ldots, 10$;

3. воздействие побочного излучения по основному каналу ($mf_j - f_i = 0$), где $m = 1, 2, \ldots, 10$;

4. воздействие побочного излучения по побочному каналу ($|mf_j - n(f_i \pm f_{\text{ПЧ}i})| - f_{\text{ПЧ}i} = 0$).

Для случаев 2–3 расчет мощности помехи на входе приемника производится аналогично с выражением (1), за исключением учета значений ослаблений побочного излучения по отношению к основному и чувствительности каждого канала побочного излучения. Если рассматриваемый номинал частоты не подходит ни под один из описанных выше случаев, то он попадает на выход алгоритма.

Следующим шагом производится расчет допустимой мощности помехи $P_{\text{П доп}}$ [4]:

$$P_{\text{Пдоп}} = P_{\text{С}} - z_{\text{тр}} - U\sigma_z, \quad (2)$$

где $P_{\text{С}}$ – мощность полезного сигнала; $z_{\text{тр}}$ – необходимое превышение мощности сигнала над помехой; U – некоторый расчетный параметр; σ_z – среднеквадратическое отклонение превышения уровня сигнала над уровнем помех.

Расчет мощности полезного сигнала на входе приемника производится по образцу расчету мощности помехи (1) за исключением того, что все переменные, имеющие отношение к передающему тракту, берутся из тактико-технических характеристик «мешающих» РЭС

$$z_{\text{тр}} = z_1 + z_2 \quad (3)$$

где z_1 – необходимое превышение медианных значений сигнала над помехой на входе приемника в канале связи без замираний (обычно определяется заводом-изготовителем РЭС).

В канале связи с быстрыми замираниями радиосигнала, для достижения 95–98 % надежности связи в диапазоне метровых волн, при дальностях трасс, превышающих 25–30 км, необходимо обеспечить дополнительные превышения сигнала над помехой (z_2) примерно 2–12 дБ.

В зависимости от требуемого значения вероятности связи ($P_{\text{св тр}}$), по графику на рисунке 4 можно найти соответствующее ей значение U [2].

Среднеквадратическое отклонение σ_z определяется разбросами параметров радиолиний (мощностей передатчиков и антенно-фидерных устройств) и множителей ослабления на трассах. Для практических расчетов можно рекомендовать следующие ориентировочные значения σ_z в метровом диапазоне волн [4]:

– 5 – 8 дБ при дальностях, меньших или равных 30 км;

– 7 – 12 дБ при дальностях, больших 30 км.

На следующем шаге оценки ЭМС РЭС происходит сравнение мощности помехи с ее допустимым значением, в случае если $P_{\text{П}} \leq P_{\text{П доп}}$, то считаем, что рассматриваемый частотный номинал удовлетворяет требованиям ЭМС,в противном случае весь процесс повторяется заново, но уже с новым номиналом. Для наиболее точного учета влияния ЭМС, данная процедура проводится с участием всех ранее присвоенных остальным радиосетям значений частот.

Далее, для пригодных частотных номиналов происходит расчет затуханий и учет замираний радиосигнала с дальнейшим вычислением значения вероятности связи, которое определяется как вероятность того, что

отношения сигнал/шум на входе приемника, с учетом быстрых и медленных замираний, будет больше требуемой величины. [4].

В случае, когда радиосвязь организована по радионаправлению и все элементы рассматриваемой особи удовлетворяют требованию по вероятности связи, происходит ее присвоение. В противном случае данная особь помещается в буфер памяти с последующим запуском цикла «формирование особи – расчет вероятности связи». Если в процессе работы алгоритма в буфере памяти оказываются две особи, то запускается процедура их скрещивания, в результате которой происходит формирование потомства (численность потомства задается на этапе входных данных). Полученное потомство состоит из родительских элементов, скомпонованных по определенному алгоритму или случайным образом (задается на начальном этапе).

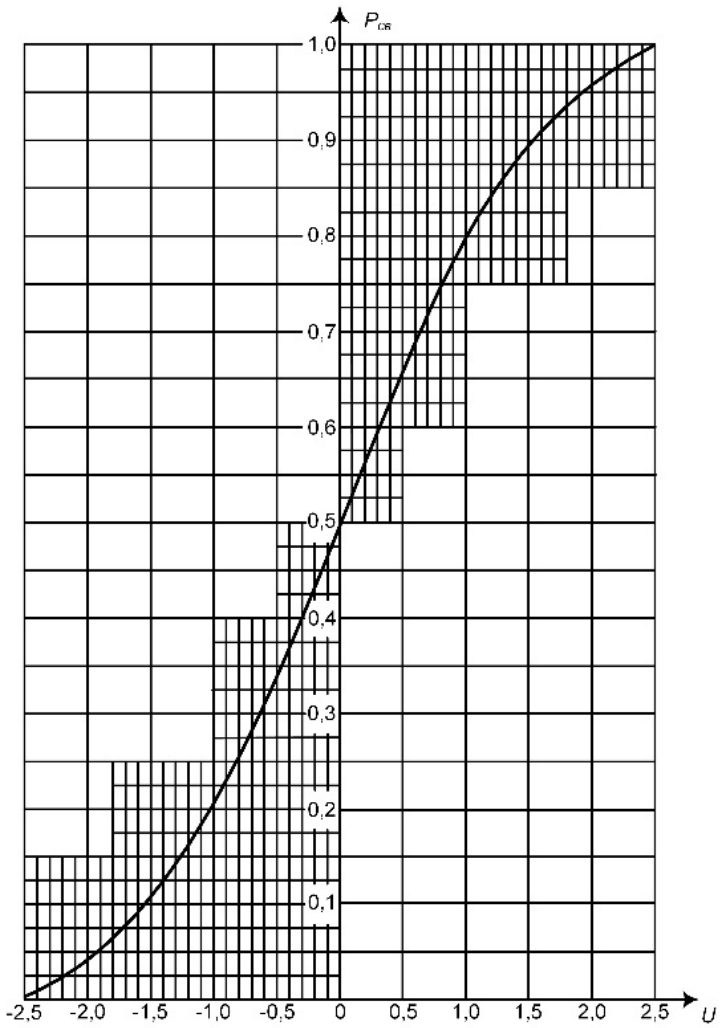


Рис. 4. Интегральная функция нормального распределения нормированной случайной величины

Далее происходит процедура мутации, которая заключается в случайной замене некоторого числа элементов потомства на номиналы из исходного массива частот (рис. 5). Процент мутаций задается на этапе ввода входных данных.

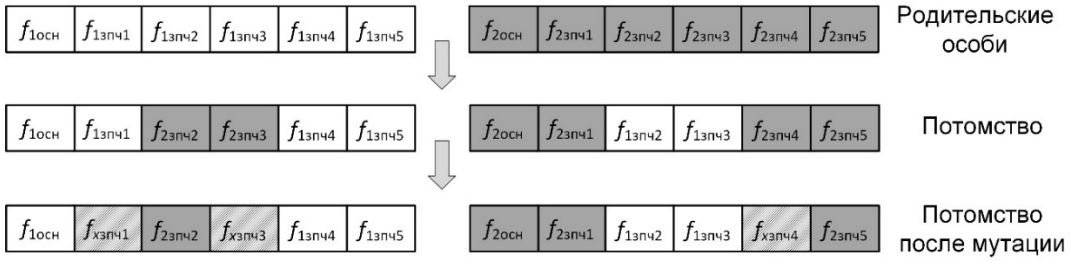


Рис. 5. Процесс формирования новой популяции



Рис. 6. Проверка возможности присвоения особи для радиосети

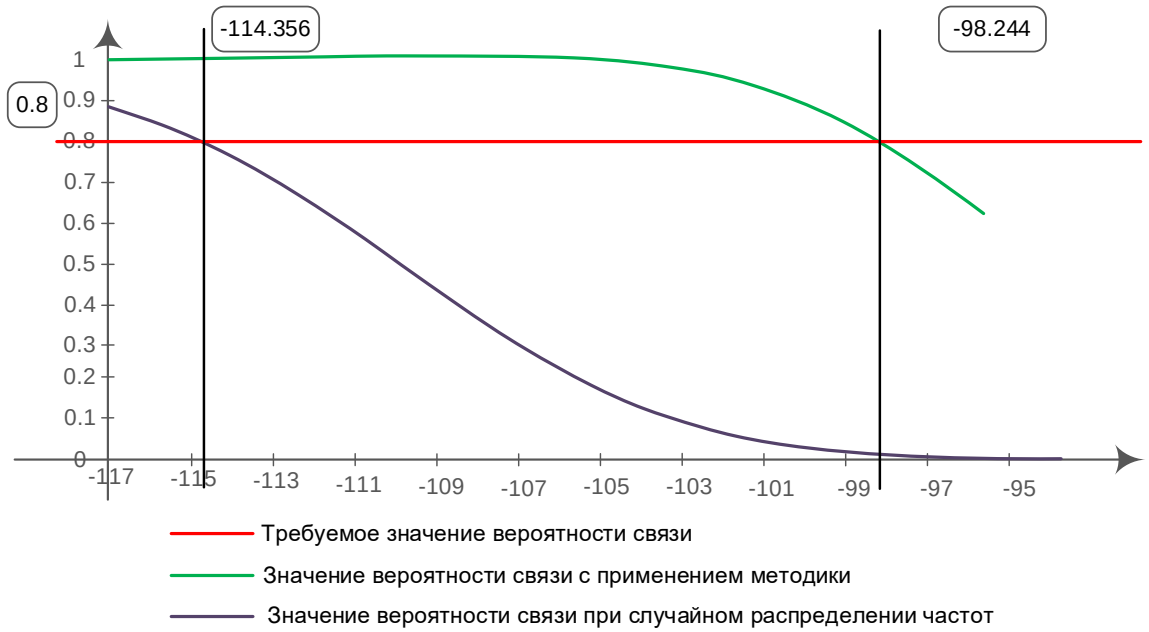


Рис. 7. Графики зависимостей вероятности связи от мощности помехи при разных способах распределения частот

Следующим этапом, по алгоритму представленному на рисунке 1, для элементов вновь сформированных особей происходит расчет вероятности связи [3]. Данный цикл повторяется до тех пор, пока не будет сформирована особь, все элементы которой удовлетворяют заданному требованию по вероятности связи ($P_{\text{св тр}}$).

Если радиосвязь организована по радиосети, то рассматриваемая особь должна удовлетворять требованию по вероятности связи каждому из радионаправлений (рис. 6).

В случае, если хотя бы один из элементов не удовлетворяет данному требованию, то происходит поиск подходящей особи с применением механизма селекции описанного выше.

Применение рассмотренной в статье методики предназначено для повышения помехоустойчивости сети радиосвязи. В качестве ее показателя используется вероятность связи $P_{св}$. На рисунке 7 представлен график зависимости показателя помехоустойчивости от мощности помехи.

График показывает, что внедрение рассмотренной методики позволяет получить энергетический выигрыш порядка 16 дБ при условии обеспечения требуемой вероятности связи.

Вывод. Таким образом, разработанная методика позволяет обеспечить рациональное распределение радиочастотного ресурса между элементами сети радиосвязи с учетом особенностей радиоэлектронных средств, которыми они образованы, а также их взаимного влияния и условий распространения радиоволн. Применение представленной методики на этапе планирования радиосвязи позволит решить вопрос электромагнитной совместимости, тем самым повысив устойчивость сети радиосвязи к воздействию непреднамеренных помех.

Список литературы

1. ГОСТ 30372-95. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.

2. Вахлаков В.Р., Рожков А.Г., Сосунов Б.В. [и др.]. Основы обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. СПб.: ВАС, 1991. 207 с.

3. Мешалкин В.А., Сосунов Б.В. Основы энергетического расчета радиоканалов. Ленинград: ВАС, 1991. 110 с.

4. Липатников В.А., Кулешов И.А. Управление радиочастотным спектром радиоэлектронных средств. СПб.: ВАС, 2011. 384 с.

5. Игнатов В.В., Сахнин А.А. Развед- и помехозащищенность систем и средств военной связи. СПб.: ВАС, 2001. 325 с.

6. Поповский В.В. Электромагнитная доступность источников радиоизлучений. СПб.: ВАС, 1987.

7. Мешалкин В.А. Проблема электромагнитной совместимости – следствие научно-технического прогресса / В.А. Мешалкин, В.А. Викторов, А.А. Пилюгин // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 12. С. 71-77.

8. Шанин А.М. Методика управления ресурсами радиолинии, образованной от передающего радиоцентра // Вопросы оборонной техники. Научно-технический журнал. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 11-12 (185-186). С. 46-53.

9. Вихарев Е.В. Динамическое распределение частотного ресурса между сетями радиосвязи / Е. В. Вихарев, В. Г. Ерышев, В. В. Шабуня // Труды II Всероссийской научно-практической конференции: «Национальная экономика и вооруженные силы: проблемы и перспективы». СПб.: СПбГТУ, 2000.

10. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 368 с.

*Коньков Денис Иванович**,** адъюнкт, den.konkov.94@mail..ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного*

RADIO FREQUENCY SPECTRUM MANAGEMENT TECHNIQUE TO ENSURE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RADIO COMMUNICATION MEANS AND COMPLEXES

D.I. Konkov

The article considers the algorithm for distributing radio frequency resources between radio network subscribers in order to improve the electromagnetic compatibility of radio electronic equipment. The presented methodology allows taking into account the features of the radio communication equipment and complexes used, as well as their mutual influence and the conditions for propagation of radio waves.

Key words: radio communication network, electromagnetic compatibility, radio frequency spectrum, frequency distribution and assignment, genetic algorithm.

Konkov Denis Ivanovich, adjunct, den.konkov.94@mail..ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 623, 537.8
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-352-353

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ, РАЗМЕЩАЕМОГО В ЗДАНИЯХ, ОТ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

М.С. Андрющенко, С.А. Сахнов, В.Ю. Галаев

В данной статье рассматриваются методы защиты электронного оборудования от мощного электромагнитного излучения (ЭМИ), возникающего в результате применения электромагнитного оружия (ЭМО). Проанализированы характеристики ЭМИ и способы его проникновения в защищаемые объекты через антенные системы и технологические отверстия. Особое внимание уделено экранированию как основному методу защиты, включая принципы реализации и необходимость многослойной защиты. Описаны различные типы экранирования, а также подходы к размещению оборудования и материалы, обеспечивающие необходимую степень защиты от ЭМИ. Правильное заземление и предотвращение утечек излучения через отверстия важны для защиты систем. Также стоит использовать радиопоглощающие материалы, чтобы уменьшить резонансные эффекты внутри помещений. Такой подход поможет лучше защитить оборудование от электромагнитных воздействий.

Ключевые слова: электромагнитное оружие, электромагнитное излучение, экранирование, защита электронного оборудования, радиопоглощающие материалы, заземление, беспилотные летательные аппараты.

Использование электромагнитного оружия (ЭМО), не являющегося летальным, не приводит к разрушению инфраструктуры и потерям личного состава, однако, вызывает нарушение функционирования электронных систем объектов вооружения и военной техники.

Применение современных видов ЭМО может привести к временным сбоям в работе радиоэлектронных комплексов (компьютеров, управляющих систем, систем связи и обмена информации) либо к необратимому физическому разрушению электронных компонентов [1 – 4].

В настоящей статье мы рассмотрим основные методы и средства защиты электронного оборудования, размещаемого внутри зданий от деструктивного воздействия мощных преднамеренных электромагнитных воздействий.

Существует два основных вида таких воздействий: узкополосные и широкополосные (см. рисунок 1) [1–3].

Импульсы электромагнитного излучения (ЭМИ), генерируемые системами ЭМО, характеризуются следующими общими характеристиками [5]:

- частота излучения *f* в диапазоне примерно 1–100 ГГц;
- пиковая выходная мощность излучаемых импульсов может достигать значений порядка 1 ГВт),
- короткая длительность импульсов (10–100 нс).

Внутрь защищаемого объекта ЭМИ может проникать через элементы так называемого ***«парадного»*** входа, которыми являются различные антенны (радиосвязи, наблюдения и т.д.), функционально предназначенные для приема электромагнитного излучения. Кроме того, существует и ***«черный вход»*** в виде технологических отверстий в экранирующей поверхности. Электромагнитное поле может создавать большие переходные токи и стоячие волны в электрических проводниках и кабелях, например сетей питания, телефонной связи или компьютерной сети. Проблемными элементами являются различные кабельные вводы и соединители (разъемы). ЭМИ может проникать через окна и люки, выполненные из неэлектропроводных материалов или не имеющие достаточного экранирования, а также через вентиляционные каналы.

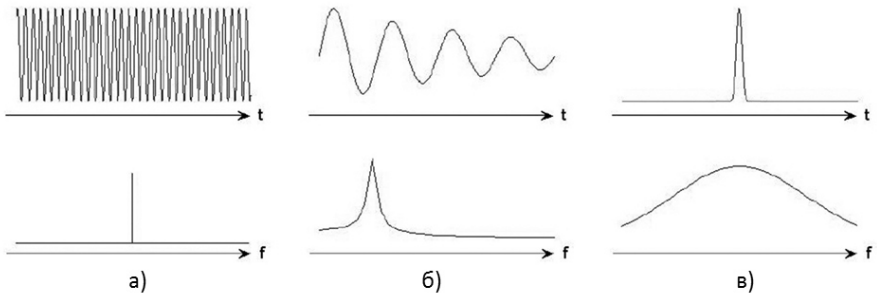


Рис. 1. Виды мощных преднамеренных электромагнитных воздействий: а - узкополосные СВЧ; б - промежуточный вариант; в - широкополосные видеоимпульсы

В рамках нашего рассмотрения будут некоторые методы защиты ***«черного входа»***, т.е. осуществляемые с помощью экранирования.

Поскольку мощность электромагнитного излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния, для повышения эффективности ЭМО используются различные методы и средства его доставки. Это могут быть крылатые ракеты (например, система CHAMP), электромагнитные бомбы и артиллерийские снаряды [6, 7]. С развитием беспилотных летательных аппаратов, увеличением их полезной нагрузки появились сообщения об их оснащении генераторами мощного ЭМИ (см. рисунки 2 и 3).



Рис. 2. Компактная система “Leonidas Pod” (компания “Epirus” США) [8]



Рис. 3. Система “MORFIUS” концерн “Lockheed Martin” [9]

Универсальный характер воздействия мощного электромагнитного излучения на электронные системы вооружения и военной техники позволяет использовать ЭМО для противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА).

Кроме проблемы обеспечения защищенности электронного оборудования от ЭМО противника существует необходимость защиты и от собственных источников мощного ЭМИ в случае их присутствия на территории защищаемого объекта. Такие источники могут использоваться при защите объекта от БПЛА противника [10 – 12].

Для решения проблемы защиты ***«черного входа»*** необходимо стремиться к размещению электронного оборудования в некотором замкнутом объеме, в котором отсутствуют крышки, отверстия и других апертуры, т.е. к применению ячеек Фарадея, обеспечивающих экранирование.

Экранирование представляет собой локализацию электромагнитной энергии в определенном пространстве за счет ограничения распространения ее всеми возможными способами [3]. Применяется с помощью металлических корпусов или металлизированных покрытий с линией заземления низкого сопротивления. Экранирование дает некоторую степень защиты от ЭМИ, но оно не может рассматриваться как единственное эффективное средство, особенно на высоких частотах, поскольку «затекание» излучения может происходить даже через самые маленькие отверстия корпуса или экрана.

Из приведенного выше определения следует, что в понятие экрана входят как детали механической конструкции, так и электротехнические детали фильтрующих цепей и развязывающих ячеек. Только их совместное применение дает эффективный результат [3].

В реальной ситуации не удается избежать наличия апертур в виде смотровых окон, вентиляционных отверстий, швов и щелей в корпусах приборов, между крышками и фланцами, отверстий для кабелей и систем жизнеобеспечения. Все это существенно усложняет задачу разработки эффективного экранирования.

На рисунке 4 приведена топологическая схема многоуровневого экранирования электронного оборудования, расположенного в здании [13]. Весь объем разбит на зоны, разделенные экранами, через которые проходят коммуникации. Внешняя поверхность объема может быть изготовлена из произвольных материалов (бетон, кирпич, металл и т. д.) и пронизана точками проникновения, такими как двери, окна, швы, электролинии, кабели и т. д.

Эффективность экранирования определяется по формуле [3]:

$$S = 20\lg\frac{E}{E_{sh}}, \text{ дБ}$$

где E – электрическая (или магнитная H) составляющая поля до установки экрана; E_{sh} – электрическая (или магнитная H_{sh}) составляющая поля после установки экрана.

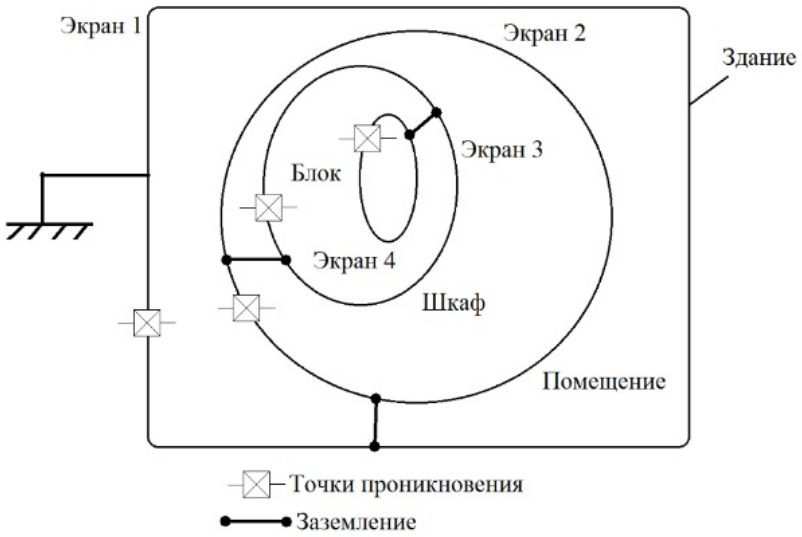


Рис. 4. Топологическая модель системы зонального экранирования для наземных систем [13]

Потери поглощения в экране на глубине скин-слоя составляют приблизительно 9 дБ. Скин-эффект особенно важно учитывать на низких частотах.

Глубина скин-слоя определяется из выражения [3, 13]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

где f - частота излучения, μ- относительная магнитная проницаемость (для меди = 1), σ- коэффициент проводимости.

Хороший для экранирования материал должен иметь достаточно высокие значения μ и σ, а также быть достаточно толстым для эффективного применения на низких частотах.

Концепция глобального экранирования предполагает использование замкнутого экрана для охвата всей системы (экран 1, рис. 4) [13]. Глобальный экран может быть выполнен на уровне здания или некоторого объекта, в некоторых ситуациях он может быть уменьшен до объема чувствительного оборудования. Глобальное экранирование желательно в том случае, если чувствительное оборудование приходится достаточно часто перемещать внутри экранированной области, модернизировать или заменять.

Наряду с глобальным может применяться специализированное экранирование, предназначенное для защиты конкретного оборудования от электромагнитных воздействий [13]. Проектируется оно согласно определенным требованиям, выполнение которых обеспечивает работоспособность данного оборудования.

В [13] используется понятие «зонального экранирования», при котором электронные средства распределены на зоны (подсистемы), каждая из которых имеет определенный уровень защиты. Экраны, окружающие зоны, представляют собой некий рубеж экранирования, что позволяет говорить о концепции многорубежного экранирования

При проведении экранирования необходимо использовать заземление экрана (рисунок 4). Заземление непосредственно не обеспечивает защиту от электромагнитных воздействий, но при выполнении должным образом предотвращает повышение уязвимости системы от них [13]. Особое значение имеет электродинамическое заземление на высоких частотах [14].

Точки проникновения или апертуры в экранах обычно возникают в следующих случаях [13]:

• проходные апертуры для электрических коммуникаций;

• проходные апертуры для волоконно-оптических линий;

• проходные отверстия для металлических коммуникаций жизнеобеспечения (водоснабжение, вентиляция, кондиционирование и т. п.);

• смотровые окна и окна освещения;

• непреднамеренные апертуры в виде щелей, зазоров, мест стыков различных элементов конструкций и т. п.:

Для предотвращения утечек экранирования применяются следующие меры:

- специальные конструкции окон и дверей для входа персонала;

- специальные конструкции для ввода сигнальных кабелей и кабелей питания;

- применение фильтров и других устройств подавления помех; - электромагнитное изолирование (развязка);

- диэлектрическое изолирование;

- изоляция переключателей.

Подробный обзор средств защиты можно найти в работах [3, 13].

Приведем принципы экранирования с помощью токопроводящих материалов, сформулированные Е.А. Штагером в работе [14]:

1. Принцип непрерывности экранирования заключается в том, что экран должен устанавливаться во всем помещении, т. е. на стенах, потолке и поле. Для исключения разрывов экранирующих материалов целесообразно применение токопроводящих грунтов.

2. Принцип заземления диэлектрических материалов, включая углеткани и токопроводящие грунты. Заземление осуществляется с помощью токопроводящих (медных) лент и самоклеющихся лент с токопроводящим слоем. Те и другие устанавливают на поверхности стен и потолка, а поверх них наносят токопроводящий грунт. Все ленты заземления имеют омический контакт с общей шиной заземления, проходящей по всему периметру помещения.

3. Принцип достаточной эффективности экранирования материалов. Выбор материалов для экранирования должен отвечать поставленным задачам, требованиям ГОСТ и СанПиН РФ.

К перечисленным принципам можно добавить очевидное утверждение, что эффективность системы защитного экранирования определяется ее самым слабым элементом, сформулированное в [5].

В таблице 1 приведены значения эффективности экранирования некоторыми строительными материалами [15 – 17].

Таблица 1

Значения эффективности экранирования

Материалы и конструкции	Сантиметровый диапазон	Метровый диапазон
Кирпичная стена толщиной 70 см	20 дБ	12 дБ
Внутренняя перегородка толщиной 30 см	10–12 дБ	2,5 дБ
Одиночное оконное стекло	1–3 дБ	0,1 дБ
Стеклопакет	7 дБ	0,3 дБ
Межкомнатные двери	3 дБ	0,5 дБ

В таблице 2 приведем для сравнения значения эффективности специальных экранирующих материалов, применяемых для изготовления средств защиты от ЭМИ в диапазоне частот 30 МГц – 40 ГГц [14].

Таблица 2

Значения экранирования специальных материалов

Название материала	ГОСТ, ТУ	Толщина, мм	Диапазон частот	Ослабление, дБ
Сталь Ст 3	ГОСТ 19903-74	1,4	От 30 МГц до 40 ГГц	100
Фольга алюминиевая	ГОСТ 618-73	0, 08	От 30 МГц до 40 ГГц	80
Сетка стальная тканная	ГОСТ 5336-73	0,03 –1,3	От 30 МГц до 40 ГГц	30
Ткань хлопчатобумажная с микропроводом	ГОСТ 17-28-70	6	От 30 МГц до 40 ГГц	20 – 40

Экранирующие свойства обычных строительных материалов, как это следует из сравнения таблиц 1 и 2, являются недостаточными. Это требует проведения работ, направленных на улучшение экранирующих и поглощающих свойств строительных материалов, таких как бетон, растворы и синтетические смолы. Поглощающие свойства можно улучшить путем диспергирования частиц, имеющих высокую электропроводность или магнитные свойства, в базовый материал (например, бетон).

Дополнительное улучшение поглощающих свойств достигается путем соответствующего формирования поверхности материала или его внутренней структуры. Цель таких модификаций состоит в том, чтобы заставить материал, подвергаемый воздействию излучения, максимально ослабить его, например, преобразуя энергию излучения в тепло. В общем случае затухание зависит от электрической проницаемости (диэлектрической постоянной) и магнитной проницаемости используемого материала, а также от частоты излучения и толщины поглощающего слоя.

Возможно применение материалов на основе углерода, порошков, содержащих никель и железо, а также ферритов и магнетита. Возможны гибридные решения с использованием полимеров. Существуют пенопластовые поглотители микроволнового излучения, в которых для улучшения поглощающих свойств используется, в частности, многократное отражение волн, достигаемое путем соответствующего формирования структуры материала и его поверхности [20, 21].

На рисунке 5 представлены графики зависимости эффективности экранирования от частоты для чистого бетона и для различных графитового порошка в его составе.

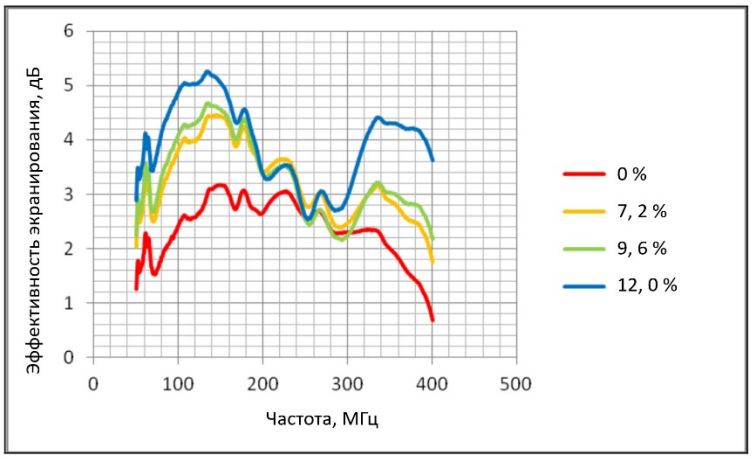


Рис. 5. Зависимость эффективности бетона от частоты для различных концентраций графитного порошка в его составе (адаптировано из [22])

При строительстве зданий, защитные меры должны включать экранирование помещений, ограждение помещений и проемов, а также поглощение излучения конструкциями здания [5, 18]. Помимо стен, потолков или крыши необходимо решить вопрос защиты вентиляционных проемов, дверей и окон [19, 20].

Наряду с экранированными дверями применяются специальные конструкции экранирующих окон (см. рисунки 6 и 7) [23].



Рис. 6. Экранирующее окно для ячейки Фарадея

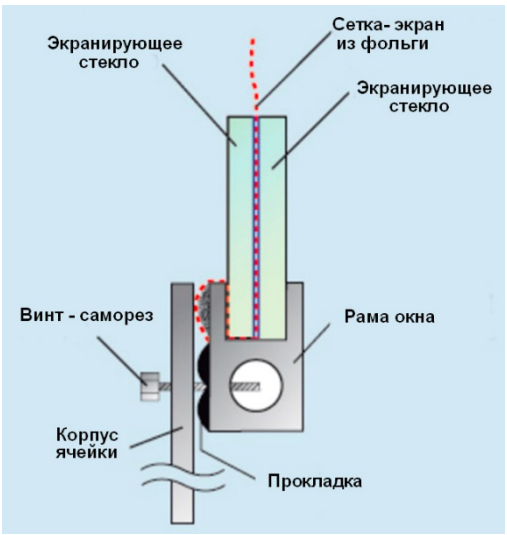


Рис. 7. Конструкция экранирующего окна

Более подробные материалы о расчете характеристик, разработке и применению защитных стекол можно найти в работе [3].

При проведении экранирования в замкнутом экранированном пространстве могут возникать проблемы, связанные с возникающими внутри него резонансами электромагнитных колебаний. Они возникают на одной из собственных резонансных частот, связанных с размерами экранированного пространства. Резонансные колебания могут серьезно влиять на эффективность экранирования системы, увеличивая напряженность полей внутри защищаемого объема [13]. Установка поглощающего материала на внутренние стенки приводит к ослаблению отраженных от них полей. Для этого могут применяться радиопоглощающие материалы, грунты и краски [24 – 26]

Выводы:

1. Защита зданий от воздействий мощного электромагнитного излучения должна быть комплексной, охватывающей как проектирование и строительство, так и реконструирование здания.

2. При проведении операций экранирования необходимо руководствоваться принципами непрерывности, применения заземления и достаточной эффективности.

3. Применяемые при строительстве строительные материалы должны иметь достаточную эффективность экранирования, которая может быть обеспечена введением в их состав соответствующих добавок.

4. Применяемые в конструкциях зданий экранирующие стекла должны иметь не только соответствующую эффективность экранирования, но и соответствующие устройства фиксации в проемах окон.

5. Для снижения резонансных явлений переотражения электромагнитного излучения внутри защищаемых помещений целесообразно применение радиопоглощающих материалов и покрытий.

Список литературы

1. Степанов В.В., Алешин И.Н., Андрющенко М.С., Куртц Д.В. Тенденции развития зарубежного электромагнитного оружия и проблема защиты объектов бронетанкового вооружения и техники // "Актуальные проблемы защиты и безопасности". Труды XXII Всероссийской научно-практической конференции. 2019. Т. 3. С. 106-111.

2. Алешин И.Н., Андрющенко М.С. Методика обоснования требований к защите объектов военной техники от электромагнитного оружия // Вопросы оборонной техники. Серия 16. 2019. Вып. 1-2 (127-128). С. 100-103.

3. Методы расчета средств защиты радиоэлектронных систем от электромагнитного излучения: моногр. / под ред. С.С. Щесняка. СПб: Изд-во ВВМ, 2016. 310 с.

4. Андрющенко М.С. Проблемы защиты наземных объектов от электромагнитного импульса по данным зарубежной печати / М.С. Андрющенко, Б.Н. Городецкий, Е.А. Штагер // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 9-10(75-76). С. 49-55. EDN SXEWAH.

5. Majcher Krzysztof, Musiał Michał, Pakos Wojciech, Rozanski Adrian, Sobótka Maciej, Trapko Tomasz. Methods of Protecting Buildings against HPM Radiation-A Review of Materials Absorbing the Energy of Electromagnetic Waves. Materials. 2020. DOI: 13.5509.10.3390/ma13235509.

6. Тенденции развития зарубежного электромагнитного оружия и проблема защиты объектов бронетанкового вооружения и техники / В.В. Степанов, И.Н. Алешин, М.С. Андрющенко, Д.В. Куртц // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. Санкт-Петербург: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2019. Том 3. С. 106-111. EDN QNHYFK.

7. Алешин И.Н., Андрющенко М.С. Стойкость систем вооружения к воздействию электромагнитного оружия - требование сегодняшнего дня // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 7-8(121-122). С. 85-90. EDN XWCDNJ.

8. Leonidas™ Counter-electronics. Epirus.inc official web site. [Electronic resource] URL: https://www.epirusinc.com/counter-electronics (дата обращения: 10.01.2025).

9. MORFIUS. C-UAS solution ready today for the Joint Force of tomorrow. Lockheed Martin official website [Electronic resource] URL: https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/MORFIUS.html (дата обращения: 10.01.2025).

10. Применение источников мощного электромагнитного излучения для защиты от беспилотных летательных аппаратов / В. В. Степанов, И. Н. Алешин, М. С. Андрющенко, Д. В. Куртц // Актуальные проблемы защиты и безопасности : Труды XXIV Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. В 7-ми томах. Москва: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2021. Том 1. С. 334-340. EDN RNLCFZ.

11. Андрющенко М.С. Методика оценки эффективности системы противодействия беспилотным летательным аппаратам / М.С. Андрющенко, А.М. Голик, С.А. Сахнов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 3(128). С. 104-107. DOI 10.53816/20753608_2023_3_104. EDN HLCGXG.

12. Андрющенко М.С. Подходы к организации противодействия беспилотным летательным аппаратам / М.С. Андрющенко, А.М. Голик, С.А. Сахнов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 1(126). С. 15-21. EDN ATVFED.

13. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие. М.: Грифон, 2019. 720 с.

14. Штагер Е.А., Штагер Д.Е., Штагер М.Д. Электромагнитное экранирование неметаллическими материалами. Монография. / Под ред. А.П. Штагер. СПб: Изд-во ВВМ, 2020. 207 с.

15. Celozzi S., Araneo R., Lovat G. Electromagnetic Shielding. IEEE Press. 2014. 355 p.

16. Кечиев Л.Н., Акбашев Б.Б., Захарьина О.С. Экранирование оптически прозрачных апертур. Москва: МИЭМ. 2010.

17. Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн. Харьков: ФИП, т. 1, № 2. 2003.

18. Bäckström M., Nordström B., Lövstrand K.G. Is HPM a threat against the civil society? In Proceedings of the 27th General Assembly of International Union of Radio Science (URSI), Maastricht, The Netherlands, 2002.

19. Ängskog P., Bäckström M., Samuelsson C., Vallhagen B.K. Shielding effectiveness and HPM vulnerability of energy-saving windows and window panes. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2018, 61. P. 870–877.

20. Ängskog P., Bäckström M., Vallhagen B. High power microwave effects on coated window panes. In Proceedings of the Asia Electromagnetics Conference (ASIAEM), Jeju, Korea, 3–8 August 2015.

21. Majcher Krzysztof, Musiał Michał, Pakos Wojciech, Rozanski Adrian, Sobótka Maciej, Trapko Tomasz. Methods of Protecting Buildings against HPM Radiation-A Review of Materials Absorbing the Energy of Electromagnetic Waves. Materials. 2020. DOI: 13.5509.10.3390/ma13235509.

22. Yee S.K., Jenu M.Z.M. Shielding effectiveness of concrete with graphite fine powder in between 50 MHz to 400 MHz. In Proceedings of the 2013 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Melbourne, 2013.

23. Holland Shielding Systems BV. Электронный ресурс: официальный сайт компании “Holland Shielding Systems BV”. [Электронный ресурс]: http://hollandshielding.com (дата обращения: 10.02.2025).

24. Патент № 2502766 C1 Российская Федерация, МПК C09D 5/32, C09D 5/03. Радиопоглощающий материал и способ получения радиопоглощающего покрытия: № 2012124162/05: заявл. 01.06.2012: опубл. 27.12.2013 / М.С. Андрющенко, С.В. Козырев, В.П. Кудрявцев [и др.]; заявитель Закрытое акционерное общество "СПЕЦХИММОНТАЖ" (ЗАО "СПЕЦХИММОНТАЖ"). EDN KDIJIG.

25. Радиопоглощающие краски для снижения радиолокационной зависимости / М. С. Андрющенко, С. В. Козырев, И. М. Старобинец, Е. А. Штагер // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2011. № 9-10. С. 26-28. EDN TOBPYB.

26. Радиопоглощающий материал для снижения заметности подвижных образцов спецтехники / Т. Ю. Ковалева, М. С. Андрющенко, К. В. Дукельский [и др.] // Передача, приём, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах: Сборник статей. Сочи: Военно-воздушная инженерная академия им. Н.Е. Жуковского (г. Москва), 2016. С. 294-299. EDN YAFNDE.

Андрющенко Михаил Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, 125msa@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Исследовательский центр Санкт - Петербургского военного ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации,

Сахнов Сергей Алексеевич, адъюнкт, sakhnov_1992@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Исследовательский центр Санкт - Петербургского военного ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации,

Галаев Вадим Юрьевич, адъюнкт, vadim.galaev.92@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Исследовательский центр Санкт - Петербургского военного ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации

PROTECTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT PLACED IN BUILDINGS FROM POWERFUL ELECTROMAGNETIC INFLUENCES

M.S. Andryushchenko, S.A. Sakhnov, V.Y. Galaev

This article discusses methods of protecting electronic equipment from powerful electromagnetic radiation (EMR) resulting from the use of electromagnetic weapons (EMW). The characteristics of the EMR and the ways of its penetration into protected objects through antenna systems and technological openings are analyzed. Special attention is paid to shielding as the main method of protection, including the principles of implementation and the need for multi-layer protection. Various types of shielding are described, as well as approaches to the placement of equipment and materials that provide the necessary degree of protection against EMR. Proper grounding and the prevention of radiation leakage through the holes are important for the protection of systems. It is also worth using radio-absorbing materials to reduce resonant effects indoors. This approach will help to better protect the equipment from electromagnetic influences.

Key words: electromagnetic weapons, electromagnetic radiation, shielding, protection of electronic equipment, radio-absorbing materials, grounding, unmanned aerial vehicles.

Andryushchenko Mikhail Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, 125msa@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Research Center of the St. Petersburg Military Order of Zhukov Academy of the National Guard of the Russian Federation,

Sakhnov Sergey Alekseevich, adjunct, sakhnov_1992@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Research Center of the St. Petersburg Military Order of Zhukov Academy of the National Guard of the Russian Federation,

Galaev Vadim Yuryevich, adjunct, vadim.galaev.92@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Research Center of the St. Petersburg Military Order of Zhukov Academy of the National Guard of the Russian Federation

УДК 004.42:621.7.043
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-363-364

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

П.В. Пугаев, Д.И. Кондаков

Данная статья посвящена сравнительному анализу традиционных аналитических методов и компьютерного моделирования при расчете силовых параметров процесса вытяжки в металлообработке. Авторы исследуют преимущества и недостатки обоих подходов, проводя эксперимент на стальных заготовках различной толщины. Для традиционного метода разработана специальная программа с пользовательским интерфейсом, а компьютерное моделирование выполнено с применением программы на основе метода конечных элементов. В современной практике все чаще применяются методы компьютерного моделирования, такие как метод конечных элементов. Сравнительный анализ результатов показал, что расхождение между методами составляет от 9,5% до 21%, что указывает на необходимость корректировки поправочных коэффициентов в традиционных расчетах. В целом, исследование подтверждает, что компьютерное моделирование позволяет получить более детализированные результаты с учетом реальных физических эффектов, обеспечивая возможность оптимизации технологических процессов и снижения затрат на экспериментальные исследования.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, математическое моделирование, программное обеспечение, анализ данных, машиностроение, технологическая сила.

Компьютерное моделирование технологических процессов представляет собой одно из направлений в современной металлургии и машиностроении [1-3]. Этот подход позволяет значительно сократить время и затраты на разработку новых технологических процессов, оптимизировать существующие и повысить качество производимой продукции. Таким методом возможно глубокое исследование процессов, в том числе и анализ силовых характеристик. Расчет силы штамповки является одним из этапов в проектировании технологических процессов. От точности этих расчетов зависит правильный выбор оборудования, оснастки и параметров технологического процесса. Традиционно использовались аналитические методы расчета по известным формулам, однако с развитием компьютерных технологий все большее значение приобретает метод компьютерного моделирования. Рассмотрим оба подхода, их преимущества, недостатки и сравним полученные результаты.

Традиционный подход к расчету силы использует набор эмпирических и теоретических формул, разработанных на основе многолетнего опыта и исследований [4-6]. Такой подход имеет ряд преимуществ: относительная простота и доступность, нет требований к специальному программному обеспечению, прозрачность расчетов, возможность быстрой приближенной оценки, применимость в условиях ограниченных ресурсов. Однако и есть ряд недостатков: использование усредненных коэффициентов, что снижает точность, ограниченный учет реальных физических явлений

(тепловых процессов, смазочных материалов), невозможность или н детального анализа других параметров, погрешность до 20-30% в сложных случаях.

В данной работе рассматривается процесс вытяжки, традиционный подход предполагает расчет силы этого процесса по формуле [7]:

$$P = \pi \cdot d_1 \cdot S \cdot \sigma_в \cdot k_1,$$

где d_1 – диаметр заготовки, S – толщина заготовки, k_1 – поправочный коэффициент.

Оценка силовых параметров проводилась для стальных заготовок, с разной толщиной стенки: 1, 1,5 и 2 мм, одинакового начального диаметра плоской листовой заготовки. Для упрощения расчетов, была разработана программа, которая осуществляет расчет силы по формуле сверху. Программа имеет пользовательский интерфейс и несколько полей ввода данных, для занесения в программу значений механических характеристик материала, геометрические размеры заготовки, поправочный коэффициент. Разработанная программа не позволяет быстро рассчитывать силу вытяжки по известной формуле. Интуитивно понятный интерфейс и возможность выбора различных материалов делают её полезным инструментом в данной работе и позволяет значительно быстрее рассчитать множество процессов с разными начальными данными. Именно с помощью этой программы в дальнейшем проводится расчет силы вытяжки, который приведен в таблице ниже.

Помимо описанного выше подхода также использовался метод компьютерного моделирования в программе Qform [8-11]. В основе компьютерного моделирования лежит использование метода конечных элементов (МКЭ), которые позволяют дискредитировать объёмную или поверхностную область исследуемого объекта на малые элементы. Для каждого из этих элементов рассчитываются механические характеристики – распределение напряжений и деформаций, изменение температуры и других параметров, важных для оценки обработки. Такая модель позволяет воспроизвести сложное взаимодействие между инструментом и заготовкой, учесть трение, а также нелинейные свойства материала, упрочнения и пр. Помимо оптимизации параметров, компьютерное моделирование помогает прогнозировать внутренние напряжения и деформации, которые могут привести к возникновению дефектов. Это позволяет выявить слабые места в технологической цепочке и внести коррективы на этапе разработки производственного процесса, что в дальнейшем повышает качество конечной продукции и способствует снижению затрат на доработку и исправление дефектов. Одной из задач моделирования является оценка силовых характеристик вытяжки, как при ручном расчете по формуле. Трение по Кулону составляло 0,1, характеристики материала (сталь 10) были использованы из встроенной библиотеки программного обеспечения. В результате была получена сводная таблица, представленная ниже.

Таблица показывает сравнение значений силы штамповки, полученных расчетным путем (теоретическим расчетом) и методом компьютерного

моделирования. Во всех вариантах наблюдается расхождение между расчетными значениями и результатами моделирования.

Сравнение данных расчета и моделирования

Варианты	Расчет	Моделирование	Разница, %
Вариант 1	32 кН	30 кН	9,5
Вариант 2	64 кН	72 кН	11,5
Вариант 3	48 кН	60 кН	21

Наименьшая разница наблюдается в первом варианте (9,5%), а наибольшая – в третьем (21%). Моделирование дало как меньшие (вариант 1), так и большие (варианты 2 и 3) значения по сравнению с расчетами. В вариантах 1 и 2 значения, полученные компьютерным моделированием, относительно близки к расчетным, разница не превышает 12%. В Варианте 3 разница значительно выше (21%), что может говорить о более высокой чувствительности модели к входным данным или упрощениях в расчетной методике, в том числе необходимо изменение поправочного коэффициента. В целом можно судить о достаточно небольших значениях разницы в расчетных значениях силы и полученных моделированием, однако стоит учитывать поправочный коэффициент в расчетах по известным формулам.

Список литературы

1. Даутов Р.З., Карчевский М.М. Введение в теорию метода конечных элементов. Учебное пособие. Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова–Ленина, 2004. 239 с.

2. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением : учебное пособие / А. А. Богатов, Д. А. Павлов, М. В. Ерпалов [и др.] ; под общей редакцией А. А. Богатова; Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. 248 с.

3. Abdullin A. D., Ershov A. A. End-to-End Simulation of Casting and Metal-Forming Operations with ProCAST and Qform Software // Metallurgist. 2014. Vol. 58, No. 5-6. P. 339-345.

4. 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.

5. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. М. : Машиностроение, 1977. 423 с.

6. Константинов И. Л. Кузнечно-штамповочное производство : учебник. 2-е изд. / И. Л. Константинов, С. Б. Сидельников. М. : ИНФРА-М ; Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. 464 с.

7. Яковлев С. С. Ковка и штамповка. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под общ. ред. С. С. Яковлева; ред. совет : Е. И. Семенов (пред.) и др. Москва : Машиностроение, 2010. 732 с.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688123 Российская Федерация. Программа для расчета параметров операции вытяжки: № 2023687941: заявл. 11.12.2023: опубл. 20.12.2023 / В. И. Платонов, И. В. Гребенщиков, И. К. Цепляев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет».

9. 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.

10. QForm 2D/3D Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением Версия VX. Часть 2. Руководство пользователя. «КванторФорм», 2018. 431 с.

11. Myshechkin A. A., Yusupov V. S., Skripnik S. V. Determination of optimal parameters of hot die forging of piercing mill mandrel by modeling in qform suite // Steel in Translation. 2023. Vol. 53, No. 11. P. 1012-1017.

Пугаев Павел Владимирович, инженер-конструктор, p.pugaev@yandex.ru, Россия, Тула, АО «АК «Туламашзавод»,

Кондаков Данила Иванович, инженер-конструктор, haikes.81@mail.ru, Россия, Тула, АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»

USING SOFTWARE AND COMPUTER MODELING TO STUDY THE TECHNOLOGICAL PROCESS

P.V. Pugaev, D.I. Kondakov

This article is devoted to the comparative analysis of traditional analytical methods and computer modeling in calculating the force parameters of the drawing process in metalworking. The authors examine the advantages and disadvantages of both approaches, conducting an experiment on steel blanks of different thicknesses. A special program with a user interface was developed for the traditional method, and computer modeling was performed using a program based on the finite element method. In modern practice, computer modeling methods, such as the finite element method, are increasingly used. Comparative analysis of the results showed that the discrepancy between the methods ranges from 9.5% to 21%, which indicates the need to adjust the correction factors in traditional calculations. In general, the study confirms that computer modeling allows obtaining more detailed results taking into account real physical effects, providing the ability to optimize technological processes and reduce the cost of experimental research.

Key words: computer modeling, mathematical modeling, software, data analysis, mechanical engineering, technological force.

Pugaev Pavel Vladimirovich, employee, p.pugaev@yandex.ru, Russia, Tula, AO «AK «Tulamashzavod»,

Kondakov Danila Ivanovich, employee, haikes.81@mail.ru, Russia, Tula, AO «NPO «SPLAV»»

УДК 535.3:681.785
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-367-368

РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ГИДРОКСИДА КАЛИЯ

Е.Е. Майоров, А.Г. Федоренко, Р.Б. Гулиев, А.В. Дагаев

Работа освещает проблему использования рефрактометрических методов и технических средств исследования оптических свойств водных растворов гидроксида калия. В оптико-физических измерениях этот метод позволяет получать достоверные и точные количественные данные по показателю преломления, определять температурную зависимость показателя преломления, также выявлять дисперсию контролируемого вещества, поэтому работа актуальна и перспективна. В статье поставлены цель, задачи, определены метод и объект исследования. Приведены внешний вид рефрактометрической и экспериментальной рефрактометрической-спектрометрической установок, а также их основные технические характеристики. Получены концентрационная, температурная и спектральная зависимости от показателя преломления водных растворов гидроксида калия разной концентрации и температуры. Выявлена сходимость рефрактометрических и рефрактометрических-спектрометрических экспериментальных данных.

Ключевые слова: рефрактометр, рефрактометр-спектрометр, водный раствор, концентрация, температура, спектральная зависимость, сходимость.

Гидроксид калия (KOH) и его водные растворы широко применяются в пищевом, химическом, оптическом, электротехническом производствах, а также в разных областях науки и техники [1, 2]. Практически значимым применением KOH является использования этого вещества в биологии, медицине, при электрохимическом травлении, нейтрализации кислотных остатков, очистки поверхностей и процессов анодного оксидирования [3, 4].

Оптико-электронные рефрактометрические средства (ОЭРС) активно применяются в изучении объектов и сред различного агрегатного состояния для выявления оптических параметров. [5, 6]. Из всего многообразия оптических методов измерений – рефрактометрия занимает ведущее место за счет высокой точности измерений, получения данных в количественном виде, низких требований к качеству изучаемой среды, а также проведения динамических измерений в реальном времени [7, 8]. Эти методы и средства дают возможность получать достоверные и надежные данные по оптическим свойствам контролируемого вещества.

В научной литературе приведены физико-химические свойства KOH, а также упоминается об показателе преломления в твердом агрегатном состоянии [9, 10]. Авторы многочисленных научных работ отмечают тот факт, что рефрактометры (промышленные, лабораторные) требуют определенной настройки под конкретную задачу исследования [11, 12]. А значит, прибор не просто калибруют, юстируют, но и под поставленную задачу разрабатывают специальное программное обеспечение для сбора, обработки и представления результатов эксперимента [13, 14].

Зарубежные ОЭРС предлагаемые на рынке позиционируют свою универсальность. В некоторые образцы данного измерительного оборудования входят спектрофотометры, что делает эти средства недоступными для отечественного потребителя за счет высокой стоимости. Как правило, такие измерительные комплексы имеют большую массу, габаритные размеры, где порой лабораторные площади не позволяют разместить данное оборудование [15, 16].

В настоящей работе представляет интерес измерение оптических параметров водных растворов КОН разной концентрации, температуры и дисперсии отечественными ОЭРС.

Получение концентрационной, температурной, спектральной зависимостей показателя преломления водных растворов гидроксида калия рефрактометрическими средствами и определило цель настоящей работы.

Постановка задачи. С помощью экспериментального рефрактометра-спектрометра и лабораторного рефрактометра УРЛ-1 получить оптические параметры водных растворов гидроксида калия. Графически представить результаты сходимости концентрационных зависимостей водных растворов, полученных на УРЛ-1 и экспериментальном рефрактометре-спектрометре, а также зависимость температурного коэффициента показателя преломления от концентрации и спектральной зависимостей показателя преломления водных растворов.

Материалы и метод исследования. В качестве объектов исследования использовали водные растворы КОН следующих концентраций: 1 %, 3 %, 5 %, 7 %, 9 %, 11 %, 13 % и 15 %. Данные пробы были предоставлены заводом-производителем для выяснения оптических свойств, которые интересовали производителя.

Для измерений показателя преломления использовались экспериментальная рефрактометрическая-спектрометрическая и рефрактометрическая установки, внешний вид которых представлен на рисунке 1.

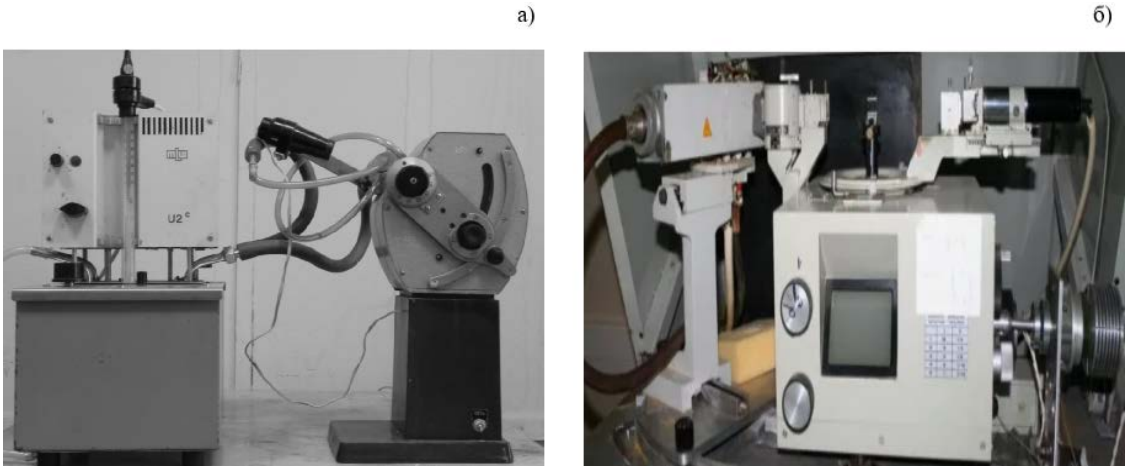


Рис. 1. Внешний вид измерительных установок:
а – рефрактометрическая;
б – рефрактометрическая-спектрометрическая

Рефрактометрическая установка предназначена для измерения показателя преломления, концентрации, дисперсии веществ жидкого или твердого агрегатного состояния. Основные технические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики рефрактометрической установки

Параметр	Значение
Длина волны излучения, нм	589, 633
Диапазон измерений: - по шкале показателя преломления, nD - по шкале сухих веществ по сахарозе, %	 1,2 …1,7 0…95
Пределы допускаемой погрешности: - по шкале показателя преломления, nD - по шкале сухих веществ, % - по сахарозе по средней дисперсии	 ± 0,0001 0,1 ± 0,0001
Сходимость показаний: - по шкале показателя преломления, nD - по шкале сухих веществ по сахарозе, %	 0,0001 0,1
Расход пробы на одно измерение, мл	0,2
Электропитание, В/Гц	220/50
Потребляемая мощность, Вт не более	25
Габариты, мм	400 × 180 × 260
Масса, кг	7,5

Рефрактометрическая-спектрометрическая установка предназначена для измерения углов, образованных плоскими поверхностями объектов, а также показателя преломления. Для исследования показателя преломления жидких веществ используется полая треугольная призма. Основные технические характеристики приведены в таблице 2.

Таблица 2

Технические характеристики рефрактометрической-спектрометрической установки

Параметр	Значение
Рабочий спектральный диапазон длин волн излучения, нм	380…760
Точность установки длины волны излучения Δλ, нм	0,0001
Рабочий температурный диапазон T, ºС	10…90
погрешность установки рабочей температуры в диапазоне T = (10…90) ºС не хуже, ºС	± 0,2
абсолютная погрешность измерения показателя преломления в указанном спектральном диапазоне и диапазоне T = (10…90) ºС не хуже	± 0,0002
Габариты, мм	1560x1120x1340
Масса, кг	75

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Исследовались водные растворы КОН и получены результаты измерений зависимостей массовой концентрации КОН в водном растворе от показателя преломления среды при условии λ = 587 нм, λ = 633 нм, и T = 20 °С. В таблице 3 и на рисунке 2 приведены данные показателя преломления, полученные экспериментальным путем на рефрактометрической установке ($n_{\text{реф}}$) при λ = 633 нм и на рефрактометрической-спектрометрической установке ($n_{\text{реф-спектр}}$) при λ = 587 нм.

Таблица 3

Данные $n_{реф}$ в сравнении с $n_{реф\text{-}спектр}$

Концентрация k, %	Показатель преломления $n_{реф}$	Показатель преломления $n_{реф\text{-}спектр}$	$\Delta n = n_{реф} - n_{реф\text{-}спектр}$
0	1,3330	1,3328	0,0002
1	1,3349	1,3353	- 0,0004
3	1,3384	1,3379	0,0005
5	1,3399	1,3397	0,0002
7	1,3433	1,3440	- 0,0007
9	1,3452	1,3460	- 0,0008
11	1,3479	1,3483	- 0,0004
13	1,3489	1,3494	- 0,0005
15	1,3510	1,3517	- 0,0007

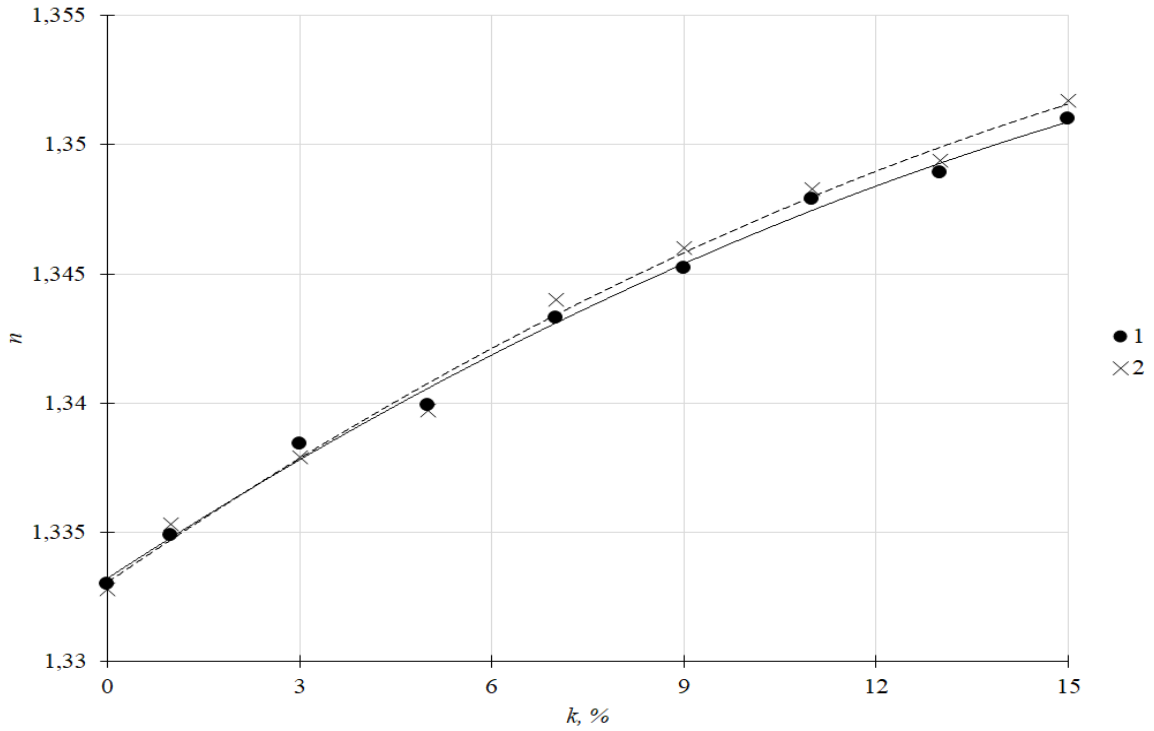


Рис. 2. Зависимость концентрации растворов КОН от показателя преломления при T = 20 °C и λ = 633 нм, λ = 587 нм: 1 - точки – экспериментальные данные, полученные на рефрактометрической установке, сплошная линия – результат квадратичной интерполяции; 2 - точки – экспериментальные данные, полученные на рефрактометрической-спектрометрической установке, пунктирная линия – результат квадратичной интерполяции

Данные экспериментальных исследований массовой концентрации КОН (1 %, 3 %, 5 %, 7 %, 9 %, 11 %, 13 % и 15 %) в водном растворе от показателя преломления среды при условии λ = 633 нм, λ = 587 нм и T = 20 °C могут быть представлены квадратичной интерполяцией:

$$n(k) = - 0{,}00003 \cdot k^2 + 0{,}0016 \cdot k + 1{,}3332$$

для измерений на рефрактометрической установке. Величина достоверности аппроксимации R^2 = 0,9960;

$$n(k) = - 0{,}00003 \cdot k^2 + 0{,}0017 \cdot k + 1{,}3331$$

для измерений на рефрактометрической-спектрометрической установке. Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}9936$.

Сходимость экспериментальных данных также приведена в таблице 3 и на рисунке 3.

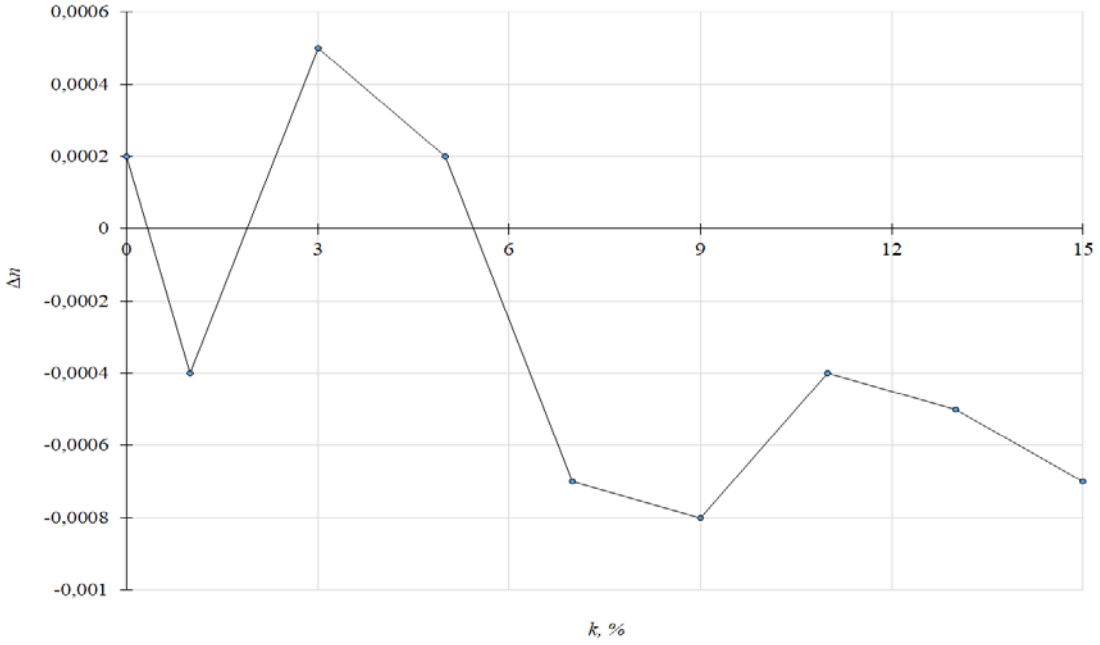


Рис. 3 Сходимость экспериментальных данных полученных на рефрактометрической и на рефрактометрической-спектрометрической установках ($\Delta n = n_{реф} - n_{реф\text{-}спектр}$)

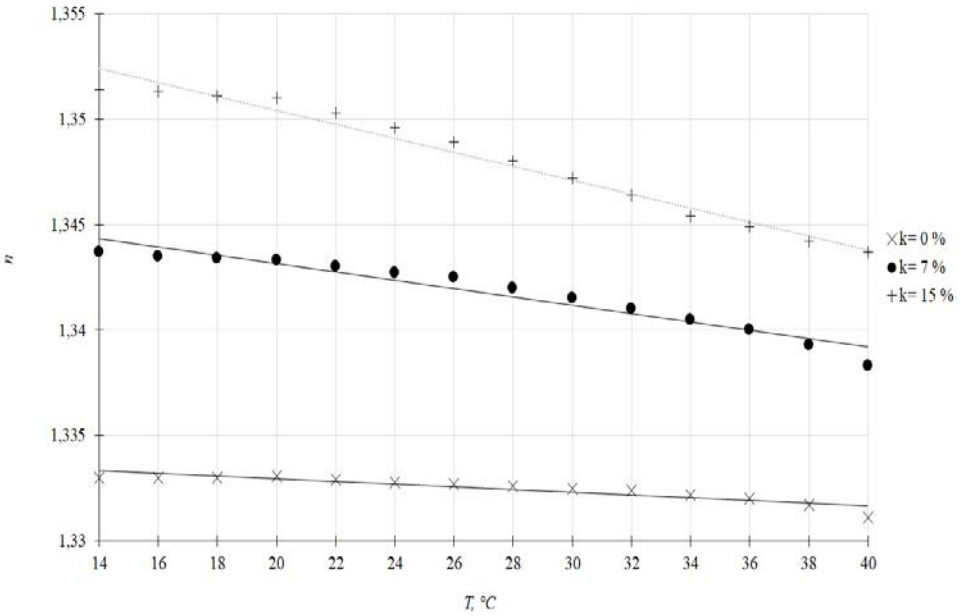


Рис. 4 Зависимость показателя преломления от температуры при разной массовой концентрации. Маркеры – эксперимент, линии – линейная интерполяция

Важным вопросом является получение данных об температурной зависимости показателя преломления водных растворов КОН разной концентрации. Измерения проводились при концентрациях (k): k = 0 %, k = 7 % и k = 15 % и температурах (T): T = 10…60 °С. На рисунке 4 приведены экспериментальные результаты и результаты линейной интерполяции.

Температурные зависимости показателя преломления могут быть представлены линейной интерполяцией:

$n(T) = - 0{,}00006 \cdot T + 1{,}3342$

при концентрации k = 0 %. Величина достоверности аппроксимации R^2 = 0,8420;

$n(T) = - 0{,}0002 \cdot T + 1{,}3471$

при концентрации k = 7 %. Величина достоверности аппроксимации R^2 = 0,9385;

$n(T) = - 0{,}0003 \cdot T + 1{,}3570$

при концентрации k = 15 %. Величина достоверности аппроксимации R^2 = 0,9440.

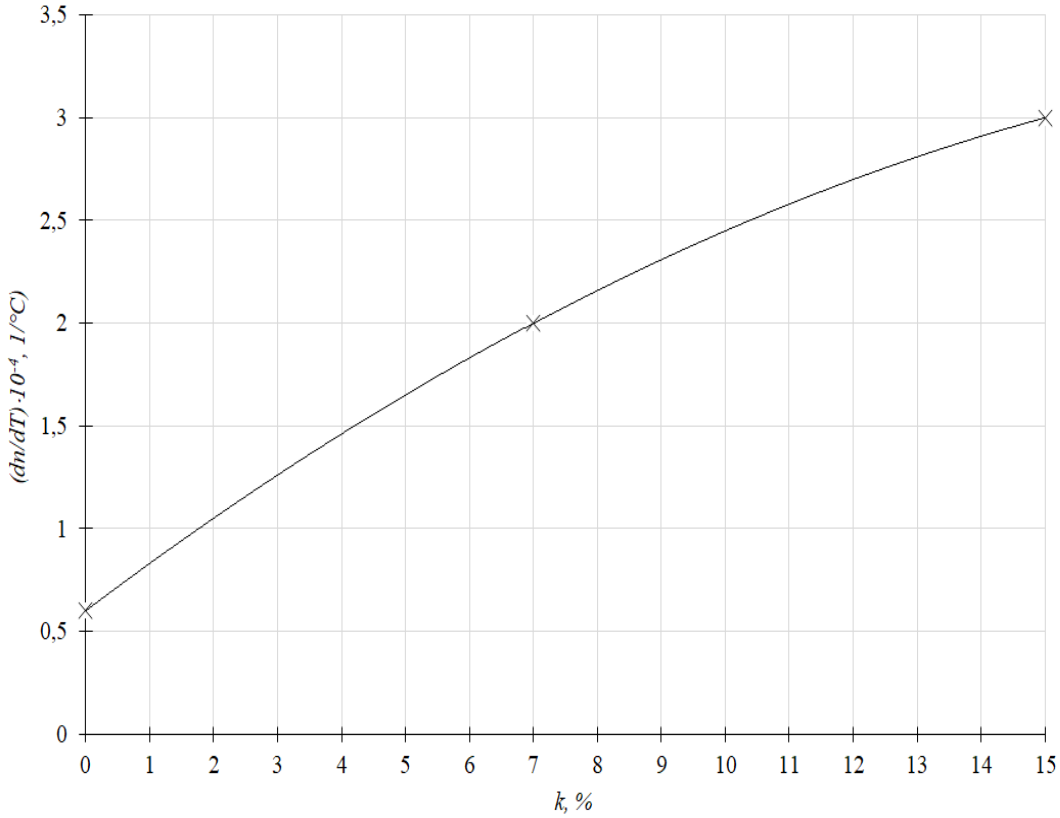


Рис. 5 Зависимость температурного коэффициента от массовой концентрации водных растворов КОН. Маркеры – эксперимент, линия – расчет

Температурный коэффициент показателя преломления (dn/dT) важен для настройки рефрактометрической установки, так как водные растворы КОН разной концентрации используются в химической промышленности, где подвергаются воздействию различных температур. Чтобы результаты

были достоверными необходимо знать значения температурного коэффициента при контроле данных веществ.

На рисунке 5 дана концентрационная зависимость температурного коэффициента.

Данная зависимость интерполировалась полиномом второй степени:

$$dn/dT\ (k) = -\ 0{,}005 \cdot k2 + 0{,}235 \cdot k + 0{,}6.$$

Данная зависимость оказалась нелинейной.

Интерес представляет спектральная зависимость показателя преломления водных растворов КОН. Измерения производились как на рефрактометрической установке при λ = 633 нм, так и на рефрактометрической-спектрометрической установке при λ = 435, 546, 587 нм. Процесс измерений проводился при T = 20 °С. Показатель преломления водных растворов КОН в зависимости от массовой концентрации и длины волны излучения представлен в таблице 4.

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований

k, %	$n_{реф\text{-}спектр}$			$n_{реф}$
	λ, нм			
	435	546	587	633
0	1,3332	1,3331	1,3328	1,3330
7	1,3496	1,3489	1,3440	1,3433
15	1,3601	1,3590	1,3517	1,3510

Зависимости показателя преломления водных растворов КОН от массовой концентрации и длины волны излучения показана на рисунке 6.

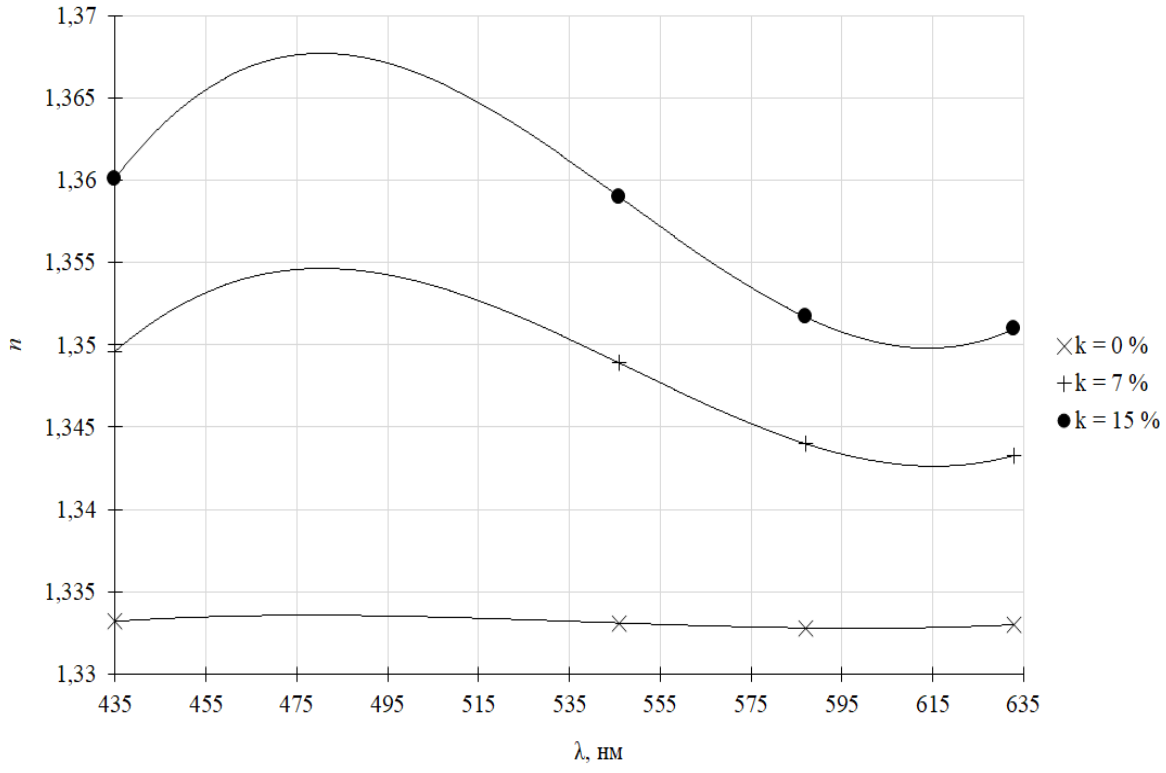


Рис. 6. Результаты измерений водных растворов КОН

Спектральные зависимости показателя преломления могут быть представлены кубической интерполяцией:

$$n(\lambda) = 9 \cdot 10^{-10} \cdot \lambda^3 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^2 + 8 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda + 1{,}1994$$

при концентрации $k = 0$ %. Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 1$;

$$n(\lambda) = 1 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda^3 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^2 + 8{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda - 1{,}931$$

при концентрации $k = 7$ %. Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 1$;

$$n(\lambda) = 2 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda^3 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^2 + 1{,}3 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda - 0{,}9951$$

при концентрации $k = 15$ %. Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 1$.

Заключение. В работе получены экспериментальные результаты по оптическим параметрам водных растворов КОН. Выявленные зависимости важны, так как помогут специалисту обеспечить правильную настройку, калибровку рефрактометрических средств контроля водных растворов КОН в диапазоне массовой концентрации $k = 0…15$ %, температур $T = 14…40$ °С и длин волн излучения $\lambda = 435$, 546, 587 и 633 нм с погрешностью 0,0001 по показателю преломления.

Список литературы

1. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы анализа в химии. Л.: Химия. 1983. 351 с.

2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. 1970. 855 с.

3. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра. 1968. 263 с.

4. Курлов В.В., Громов О.В., Таюрская И.С., Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б. Применение разработанного рефрактометрического датчика в пищевом производстве // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 2. С. 1-12. DOI: 10.25791/pribor.2.2021.1237.

5. Афанасьев В.А. Оптические измерения. – М.: Недра. 1968. 263 с.

6. Громов О.В., Гулиев Р.Б., Черняк Т.А., Майоров Е.Е., Дагаев А.В., Таюрская И.С. Применение метода полного внутреннего отражения для исследования жидкофазных сред на основе ботулотоксина // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65. №5. С. 343-349. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-343-349.

7. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение. 1987. 264 с.

8. Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Громов О.В., Дагаев А.В., Курлов В.В., Майоров Е.Е., Таюрская И.С. Рефрактометрические средства контроля водных растворов тетрахлорэтилена // Научное приборостроение. 2022. Т.32. №2. С. 75-83

9. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М. 1981. 640 с.

10. Майоров Е.Е. Призменная рефрактометрия измерения оптических характеристик каустизационного щелока // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Третья Всероссийская

научная конференция (СПб., 18-22 апреля 2022 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2022. С. 59-61. DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3.

11. Арефьев А.В., Афанасьева О.В., Дагаев А.В., Курлов В.В., Майоров Е.Е., Таюрская И.С. Рефрактометрические методы и средства контроля этанола, пропанола и их водных растворов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 594-601. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-594-601.

12. Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Пушкина В.П., Цыганкова Г.А. Рефрактометрический контроль состава сухого остатка лактицинии в реальном производстве // Приборы. 2023. №9. С.10-14.

13. Майоров Е.Е. Определение показателя преломления при нагревании новейших отечественных светоотверждаемых композитов современным рефрактометрическим прибором // Приборы. 2024. № 5. С. 51-55

14. Майоров Е. Е. Рефрактометрический контроль оптически мутных жидкофазных сред экспериментальной установкой // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 51–55. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-51-55.

15. Майоров Е. Е. Курлов В.В., Арефьев А.В., Пушкина В.П. Рефрактометрические технологии в исследовании оптических свойств водных растворов хлорида натрия // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 7. С. 382-386. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-382-383

16. Майоров Е.Е., Шаламай Л.И., Мендоса Е.Ю., Лампусова В.Б., Оксас Н.С., Косов С.А. Рефрактометрическое исследование композитных материалов для прямой реставрации зубов // Медицинская техника. 2024. №5. С. 30-32

Майоров Евгений Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, majorov_ee@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Федоренко Андрей Григорьевич, канд. техн. наук, доцент, 12051312@mail.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) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

REFRACTOMETRIC METHODS AND MEANS OF STUDYING THE OPTICAL PROPERTIES OF AQUEOUS SOLUTIONS OF POTASSIUM HYDROXIDE

E.E. Maiorov, A.G. Fedorenko, R.B. Guliyev, A.V. Dagaev

The work highlights the problem of using refractometric methods and technical means to study the optical properties of aqueous solutions of potassium hydroxide. In optical and physical measurements, this method allows obtaining reliable and accurate quantitative data on the refractive index, determining the temperature dependence of the refractive index, and also detecting the dispersion of the controlled substance, so the work is relevant and promising. The article sets the goal, objectives, defines the method and object of research. The paper presents the appearance of refractometric and refractometric-spectrometric installations, as well as their main technical characteristics. Concentration, temperature, and spectral dependences on the refractive index of aqueous solutions of potassium hydroxide of different concentrations and temperatures are obtained. The convergence of refractometric and refractometric-spectrometric experimental data is revealed.

Key words: refractometer, refractometer-spectrometer, aqueous solution, concentration, temperature, spectral dependence, convergence.

Maiorov Evgeny Evgenievich, candidate of technical sciences, docent, majorov_ee@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Fedorenko Andrei Grigorievich, candidate of technical sciences, docent, viktorgolubkov@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 Alexsander Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, adagaev@list.ru, Russia, Ivangorod, Ivangorodskii Humanitarian-Technical Institute (branch of) Saint-Petersburg University of Aerospace Instrumentation

УДК 625.711.812
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-376-377

УТОМЛЕНИЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВОДИТЕЛЯ

О.В. Чуприков, В.И. Котовщиков

В статье предлагается к рассмотрению вопросы, влияющие на процесс временного снижения работоспособности военного водителя, наступающий в результате его деятельности. Влияние утомления на работоспособность водителя проявляется в снижении безопасности движения. Оно оказывает негативное влияние на все основные функции восприятия и другие психофизиологические качества водителя.

Ключевые слова: работоспособность водителя, утомление водителя, оптимальный уровень работоспособности.

Надежность водителей в значительной степени зависит от их работоспособности. Сниженной работоспособности водителя при управлении военной автомобильной техникой (ВАТ) может привести не только к ошибкам управления автомобилем, но и к невыполнению боевой задачи.

Управление ВАТ требует значительной нервной перегрузки и усилий, которые провоцируют утомление различной степени – от легкой усталости до сильного переутомления. Усталость усиливается в результате недостаточного отдыха перед выездом в рейс, плохой видимости, неблагоприятных погодных условий, шума и вибрации в кабине, штатно одетых на водителя бронежилета и каски, выполнением водителем на маршруте несвойственных дополнительных задач (ремонт автомобиля в ходе рейса, оказание медпомощи и другие).

Утомление бывает эмоциональное, физическое и умственное. В работе водителя элементы физического труда сочетаются с интенсивной умственной нагрузкой, протекающей на фоне выраженного эмоционального напряжения. Причем эмоциональное утомление доминирует и является основным фактором, определяющим развитие общего утомления.

Характерным и особенно опасным симптомом утомления является сонливость, иногда приводящая к засыпанию за рулем. Чувствуя сонливость, водитель может бороться со сном, но он должен знать, что засыпание может наступить внезапно. Внезапное засыпание иногда приводит к тому, что сон, который видит водитель, принимается им за реальность. Сонливость водителя может появиться не только при утомлении, но и в монотонной обстановке [1].

Умственные навыки, которые определяют быстроту оценки рабочей обстановки, необходимую для своевременного принятия соответствующих решений, имеют особенно большое значение в деятельности водителя. Они позволяют без дополнительного обдумывания применять имеющиеся навыки и опыт для выполнения сложных маневров связанных с объездом неожиданно появившихся препятствий в виде подбитой техники или минно-взрывных заграждений. Умственные навыки имеют большое значение в прогнозировании дорожной и рабочей обстановки. В процессе своей деятельности водитель непрерывно сталкивается с повторением некоторых ситуаций, процесс развития которых более или менее изучен им на базе предыдущего опыта, в процессе подготовки. Эти ситуации становятся для водителя как бы стандартными, он уже прогнозирует дальнейшее развитие событий и принимает соответствующее решение. Чем шире спектр таких навыков у водителя, тем большую безопасность он способен обеспечить.

Правильное и, что очень важно, своевременное решение будет зависеть, с одной стороны, от его умения логически мыслить, а с другой – от знания основ безопасности движения и управления автомобилем во время выполнения перевозок воинских грузов, а также от умения применять эти знания на практике.

Моторные навыки являются важными в деятельности водителя. Именно двигательные навыки, доведенные до уровня автоматизма действий, позволяют водителю выполнять большой объем работы без признаков усталости.

С увеличением скорости движения автомобиля сокращается время не только на выполнение маршрутного задания, но снижается вероятность

наведения и попадания беспилотного летательного аппарата противника в автомобиль.

Сознательно и успешно выполнить большое количество действий практически невозможно. Поэтому необходимо довести навыки до уровня автоматизма, физиологической основой которых является динамический стереотип. В результате многократного повторения последовательно и закономерно сменяющих друг друга действий нервные процессы приобретают стереотипный характер, т. е. складываются в определенную систему, которая называется динамическим стереотипом. Динамический стереотип лежит в основе формирования двигательных водительских навыков. Он обеспечивает не только своевременность управляющих действий водителя, но и их адекватность, соответствие быстро меняющейся рабочей обстановке. В этом и выражается динамичность навыков, доведенных до автоматизма при выполнении действий. Важнейшей задачей при формировании таких навыков является объединение отдельных управляющих действий в целостный двигательный акт, подчиненный общей задаче. Пример: водитель при появлении препятствий на дороге выполняет одновременно торможение и поворот рулевого колеса как один целостный двигательный акт. Взаимодействие ног водителя при трогании с места – также целостный двигательный акт, состоящий из двух элементарных актов: отпускания педали сцепления и нажатия на педаль газа.

При формировании двигательных навыков различают три этапа [2]. Рассмотрим на примере упражнения «змейка» в первоначальной подготовке водителя и в дальнейшем при совершенствовании навыков.

Первый этап в обучении состоит из изучения отдельных элементов движения и объединения отдельных частичных действий в одно целостное действие. Чтобы научиться управлять автомобилем, человек должен узнать и запомнить, какие действия и в какой последовательности он должен производить. В начале первого этапа каждое новое управляющее движение выполняется сознательно и под контролем зрения. Внимание обучаемого сосредоточено на отдельных собственных движениях, а не на результатах их выполнения. Движения его носят разрозненный характер, он делает много лишних и нецелесообразных движений, излишне напряжен, сильно сжимает рулевое колесо, неточно переключает рычаги управления, быстро утомляется.

На первом этапе формирования двигательного навыка отдельные движения объединяются в целостный двигательный акт, что является выражением формирующегося двигательного стереотипа.

На втором этапе по мере повторения упражнений лишние нецелесообразные движения устраняются, уменьшается напряжение. Движения становятся более точными. Постепенно ослабевает зрительный контроль за ходом выполнения действий и увеличивается роль двигательного контроля. Передача контроля суставно-мышечному чувству двигательного анализатора имеет первостепенное значение при выработке любого двигательного навыка.

То же самое происходит и с начинающим водителем, который на первом этапе формирования двигательного навыка контролирует зрением каждое управляющее действие, а затем, по мере выработки автоматизма навыков, зрительный контроль снимается и все его действия контролируются суставно-мышечным чувством.

На третьем этапе большинство действий выполняются автоматически, т.е. без участия сознания, которое осуществляет только функцию контроля.

На этой стадии формирования навыка, а также в ходе совершенствования водительских навыков необходимо вводить различные усложнения с целью выработки вариативности навыка: вождение по неровной дороге, сужение коридора упражнения, повышение скорости движения при выполнении упражнения.

В итоге это поможет целенаправленно сформировать такие навыки для начинающего водителя как осмотрительность, снижение внимания на внешние раздражители, повышение работоспособности, а при совершенствовании навыков водительского мастерства – умение принимать правильные решения при возникновении нестандартных ситуаций [3].

Динамический стереотип к концу этапа сформирован, большинство операций по управлению выполняется автоматически, но под контролем сознания.

Однако упражнения только помогают сформировать первоначальные навыки и умения, до профессионального мастерства еще далеко. Совершенствование водительского мастерства происходит на протяжении всей водительской деятельности. Вместе с навыками в процессе практической деятельности у водителей формируется умение, которое характеризует степень подготовленности к выполнению своих обязанностей.

С опытом вырабатывается индивидуальная манера управления транспортным средством, развивается умение выбирать способы действий с учетом изменяющихся условий движения, возникает уверенное ориентирование в сложной обстановке, т.е. все, что называют мастерством вождения, к чему водитель подготавливается содержанием и направлением всего учебно-воспитательного процесса. Мастерство предполагает умение сознательно и своевременно пользоваться действиями, доведенными до автоматизма, и, если нужно, сознательно контролировать их.

Шаблонные действия водителей в некоторых случаях могут быть причинами как тяжелых ДТП, так и получения травм и ранений в ходе выполнения задач по воинским перевозкам.

Навыки формируются в процессе отработки правильности выполнения упражнений и их неоднократного повторения. Однако не всякое повторение действий может привести к положительному результату. Продуктивность навыка зависит от объективных и субъективных факторов.

Для того чтобы повторные действия формировали навык, необходимо выполнить ряд условий [3]:

обучаемый должен уяснить цель и значение выработанного навыка и активно стремиться овладеть им;

обучаемый должен знать результат каждого действия, допущенные при этом недостатки и ошибки.

Поэтому задачами инструктора практического вождения является своевременно указать на ошибки обучаемых и пути их устранения, а также стимулировать активность обучаемых, чтобы они сами научились правильно оценивать уровень своей подготовленности. Предъявляемые к курсанту требования должны соответствуют его психофизиологическим и физическим возможностям.

Потому подготовка водителей должна строиться с учетом его психики [4], оптимальное распределения упражнений по времени, т. е. планирование тренировок. Здесь не должно быть шаблона. Нередко инструктор практического вождения не знает индивидуальных особенностей и возможностей обучаемых, между ними отсутствует взаимопонимание. Это затрудняет обучение и снижает уровень подготовки.

Установлена определенная зависимость формирования навыка от времени упражнений (рис. 1).

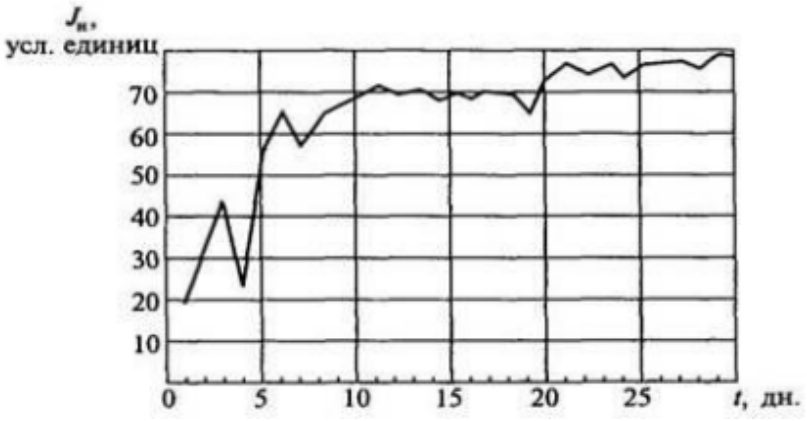


Рис. 1. Кривая зависимости формирования сенсомоторного навыка от времени упражнений

Наиболее успешно навыки развиваются в начале обучения. В этот период кривая формирования навыка круто идет вверх. Далее подъем замедляется, становится на длительное время незначительным и даже приостанавливается, что на кривой отражается в виде плато – отрезка, идущего почти горизонтально. Причиной такой задержки нередко бывает несоответствие усвоенных приемов высоким требованиям, которые предъявляются по мере формирования навыка, а также использование обучаемыми новых приемов выполнения упражнения. Затем, когда обучаемый справится с возникшими затруднениями, опять начинается медленный подъем [5].

Новые навыки могут формироваться на основании ранее приобретенных, причем старые навыки могут облегчать процесс формирования новых или тормозить его. Влияние ранее усвоенных навыков на процесс обучения называют переносом. Перенос может быть положительным или отрицательным.

Положительный перенос навыков, может быть, при наличии ряда похожих элементов у старых и новых навыков.

Отрицательный перенос – это затруднение формирования новых навыков из-за наличия старых.

При переводе водителя на транспортное средство другого типа или марки необходимо учитывать конструктивные особенности кабины и органов управления, а также динамические характеристики нового транспортного средства. Отрицательный перенос навыков при управлении, особенно в первые дни, может резко отразиться на качестве управления и надежности водителя.

Если водитель этого не знает, то он недостаточно контролирует свои действия, в результате чего может допускать грубые ошибки. Если он об этом и знает, то в условиях дефицита времени происходит срабатывание так называемого вредного автоматизма. Водитель автоматически начинает выполняет управляющие действия в соответствии с расположением кнопок, рычагов, тумблеров и т.д. на предыдущей машине без учета изменений в их расположении на новой [6].

Примерами вредного переноса сенсорного навыка могут быть ошибки, возникающие у водителей вследствие нарушения глазомера при переходе с легкового автомобиля на грузовой и наоборот. Причиной нарушения глазомера в таких случаях является изменение расстояния от глаз водителя до дорожного покрытия.

Чтобы избежать ошибок, с вязанных с отрицательным переносом навыков в ВС РФ действует положение по переподготовке водителей для работы на транспортных средствах других марок.

Навыкам свойственна изменчивость. Если тренировка прекращается, то навыки разрушаются. Разрушение навыка не означает полной утраты человеком возможности выполнять выработанные ранее и доведенные до автоматизма действия, но качество их выполнения в той или иной степени снижается. Разрушение особенно сказывается на сложных и слабо закрепленных навыках. В большей степени изменяется время выполнения управляющих действий.

После перерыва в тренировках водитель выполняет действия то быстрее, то медленнее по сравнению с требуемой продолжительностью. Между тем именно своевременность действий водителя нередко имеет решающее значение для безопасности управления и эффективности работы.

Следует отметить, что процесса разрушения навыков водители не замечают. Это является одной из причин более частого попадания в ДТП водителей-непрофессионалов, у которых уровень выработанных навыков управления автомобилем из-за нерегулярности тренировок нередко оказывается сниженным. У водителей-профессионалов снижение качества выработанных навыков может произойти лишь при длительных перерывах в работе (болезнь, временная смена профессии, лишение права на управление и т.д.).

Таким образом для поддержания необходимого уровня выработанных в процессе обучения навыков и их дальнейшего совершенствования необходима регулярная тренировка.

Список литературы

1. Горбачев М.Г. Самоучитель безопасного вождения Современный стиль. М.: Престиж книга, 2006. 288 с.

2. Дятлов М.Н. Профессиональная надежность водителя автомобильного транспорта / М.Н. Дятлов, К.О. Долгов, А.Н. Тодорев // Молодой ученый. 2013. № 10. С. 134-138.

3. Информационный сборник единых учебных планов и программ подготовки водителей автотранспортных средств (А, В, ВС, Д, Е); Институт развития профессионального образования. Москва, 2012. 105 с.

4. Дружинин В.Н. Психология. Учебник / Под. ред. В.Н. Дружинина. СПб.: Питер, 2009. 656 с.

5. Мурашов А.А. Педагогическая риторика. М.: Педагогическое общество России, 2001. 480 с.

6. Николаев А.Н. Подготовка по вождению кандидатов в водители. М.: Аник, 2008. 73 с.

Чуприков Олег Валерьевич, преподаватель, tankusa@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Котовщиков Владимир Иванович, преподаватель, kotovschikov@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военный институт (инженерно-технический)

FATIGUE AND ITS IMPACT ON DRIVER PERFORMANCE

O.V. Chuprikov, V.I. Kotovchikov

The article proposes to consider issues that affect the process of temporary reduction in the performance of a military driver, which occurs as a result of his activities. The impact of fatigue on the driver's performance is manifested in a decrease in traffic safety. It has a negative effect on all the main functions of perception and other psychophysiological qualities of the driver.

Key words: driver performance, driver fatigue, optimal performance level.

Chuprikov Oleg Valerievich, teacher, tankusa@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Kotovchikov Vladimir Ivanovich, teacher, kotovschikov@rambler.ru, Russia, St. Petersburg, Military Institute (engineering and technical)

УДК 004.94:69
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-383-384

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БАЛОК КОМПЬЮТЕРНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

М.А. Синелюбов

В статье рассматривается применение компьютерного моделирования для расчета балок на срез с использованием метода конечных элементов. Проанализированы возможности современных программных комплексов для создания высокоточных параметрических моделей, учитывающих нелинейные свойства материалов и различные условия нагружения. Особое внимание уделено проблеме среза в балках, представляющего собой деформацию, при которой смежные слои материала смещаются относительно друг друга параллельно плоскости контакта. Подробно рассмотрен классический подход к расчету и отмечены его ограничения в сравнении с компьютерным моделированием. На примере сравнения стержней разного сечения с одинаковой площадью продемонстрированы преимущества компьютерного моделирования для анализа деформаций и прогнозирования разрушения конструкций. Представлены результаты моделирования в программном комплексе. Обсуждаются перспективные гибридные подходы к моделированию, сочетающие метод конечных элементов с другими численными методами, и подчеркивается необходимость верификации результатов компьютерного моделирования экспериментальными данными.

Ключевые слова: Компьютерное моделирование, метод конечных элементов, строительство, конструкции, гибридные методы расчета, прочность конструкций, анализ информации.

Компьютерное моделирование стало неотъемлемой частью современного проектирования, особенно при расчете конструкций, деталей, механизмов на различные виды нагрузок. Одним из вариантов применения компьютерного моделирования является расчет балок на срез, который представляет собой сложную задачу проектирования, в таком случае сдвиговые напряжения могут привести к опасным разрушениям даже при соблюдении требований по прочности на изгиб.

Метод конечных элементов [1-2] является наиболее распространенным методом для моделирования поведения балок при сдвиговых нагрузках. Суть метода заключается в разбиении балки на множество малых элементов с заданными свойствами материала. Современные программные комплексы, такие как ANSYS, ABAQUS, SCAD и пр., позволяют создавать высокоточные модели, учитывающие: нелинейные свойства материалов, геометрическую нелинейность, контактные взаимодействия, динамические эффекты, учет собственного веса конструкции [3-5]. Современные САПР-системы позволяют создавать параметрические модели, в которых можно быстро модифицировать геометрию, материалы и условия нагружения балок. Это дает возможность проводить оптимизационные расчеты, исследовать влияние различных параметров на сдвиговую прочность, выполнять автоматизированный подбор сечений. При моделировании срезовых напряжений особое внимание уделяется созданию адекватной сетки конечных элементов с достаточным сгущением в зонах концентрации напряжений.

Срез в строительных балках представляет собой деформацию, при которой смежные слои материала смещаются относительно друг друга параллельно плоскости их контакта [6]. Напряжение среза (τ) вычисляется как отношение поперечной силы (V) к площади поперечного сечения (A): $\tau = V/A$. Однако распределение касательных напряжений по сечению неравномерно и зависит от формы сечения. Для более точного расчета используются формулы Журавского [7]. Такой подход для расчета является весьма рутинным процессом и не позволяет получить визуализацию процесса разрушения, глубоко изучить схемы распределения напряжений, деформаций, конечные геометрические формы балок или стержней. Поэтому для лучшего изучения поведения конструкций на срез применяются методы компьютерного моделирования [8-9]. Моделируются опоры, заделки, задаются ограничения перемещений и поворотов, прикладываются силы и распределенные нагрузки. Для моделирования среза обычно используются поперечные силы, действующие перпендикулярно оси балки. Генерируется сетка конечных элементов, причем в зонах предполагаемых концентраций напряжений (например, вблизи опор или в местах изменения сечения) сетка делается более мелкой для повышения точности расчетов.

Рассмотрим ситуацию, при которой стержень зажат в двух элементах, например, блоках [10]. При этом стержень служит не только элементом соединения, но и удержания взаимного положения. Однако стержень может иметь разную форму поперечного сечения, что влияет на выдерживаемую нагрузку. В этом случае необходимо осуществлять моделирование для более полного анализа картины. Возьмем два варианта сечений, наиболее распространенных в прокате: квадратный и круглый, при этом площади их поперечных сечений одинаковы. В программном комплексе Ansys смоделируем срез этих двух балок, на рисунке 1 приведены стадии разрушения стального стержня квадратного сечения.

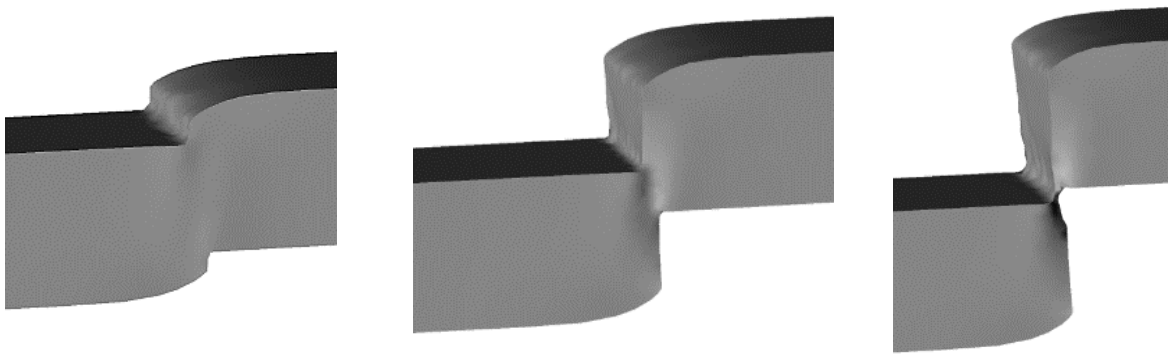


Рис. 1. Стадии разрушения

Данные изображения иллюстрируют постепенное разрушение рассматриваемого стержня, что в целом является характерным для такого типа нагрузок. Самым важным параметром таких конструкций является выдерживаемая нагрузка, график которой также был получен компьютерным моделирование (рис. 2).

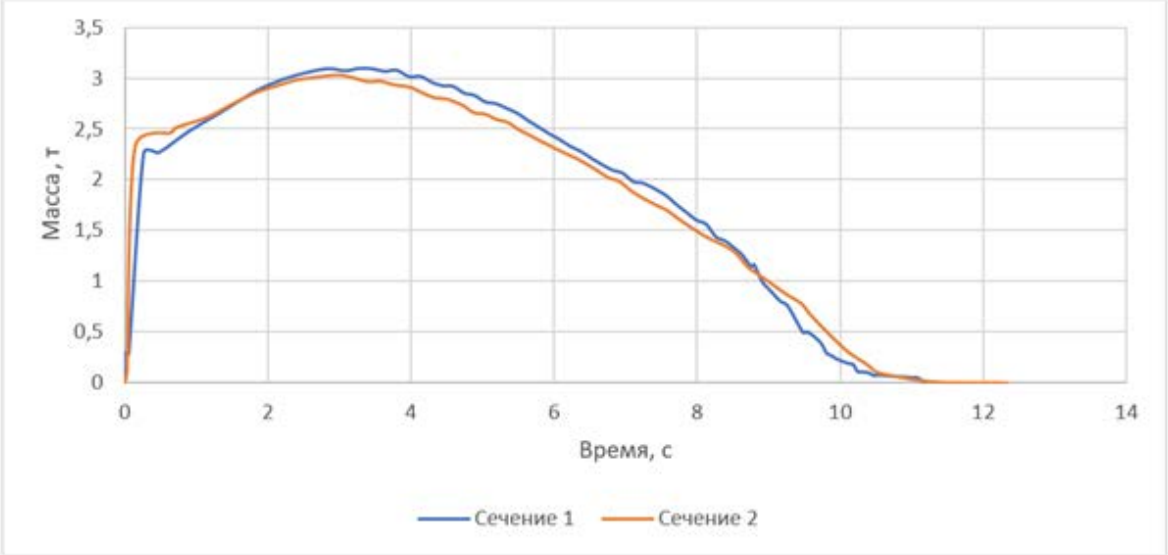


Рис. 2. График

Данный график иллюстрирует выдерживаемую массу, выявлено, что сечение типа 2 до начала деформационных изменений способно выдержать 2,5 т, в то же время сечение типа 1 на 10% меньше – около 2,3 т. В дальнейшем графики до разрушения имеют похожий вид. Таким образом, несмотря на одинаковую площадь поперечного сечения, благодаря МКЭ было установлено, какое сечение имеет лучшие характеристики. Но несмотря на высокую точность, в настоящее время развиваются гибридные подходы, сочетающие методы конечных элементов с другими численными методами. Например, комбинация МКЭ с методом граничных элементов (МГЭ) позволяет более эффективно моделировать распространение трещин при срезе. Другой перспективный подход – сочетание МКЭ с методом дискретных элементов (МДЭ), что особенно эффективно при моделировании хрупкого разрушения материалов.

Тем не менее, результаты компьютерного моделирования требуют критического анализа и верификации. Сочетание компьютерного моделирования с экспериментальными исследованиями и аналитическими методами обеспечивает наиболее надежный подход к проектированию безопасных и экономичных строительных конструкций.

Список литературы

1. A temporal stable smoothed particle finite element method for large deformation problems in geomechanics / W. H. Yuan, M. Liu, N. Guo [et al.] // Computers and Geotechnics. 2023. Vol. 156. P. 105298.

2. Шимкович Д.Г. Инженерный анализ методом конечных элементов / Д.Г. Шимкович. М.: ДМК Пресс, 2018. 738 с.

3. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский. М.: СПб: БХВ-Петербург, 2011. 327 с.

4. Левин В.А. Развитие дефектов при конечных деформациях. Компьютерное и физическое моделирование / В.А. Левин, В.В. Калинин, К.М. Зингерман. М.: Физматлит, 2007. 392 с.

5. Семенов А.А. Металлические конструкции. Расчет элементов и соединений с использованием программного комплекса SCAD Office: Учебное пособие / А.А. Семенов, А.И. Габитов, И.А. Порываев. М.: АСВ, 2014. 338 с.

6. Аркуша А.И. Техническая механика: Теоретическая механика и сопротивление материалов / А.И. Аркуша. М.: Ленанд, 2016. 352 с.

7. Схиртладзе А.Г. Сопротивление материалов. В 2-х ч. Ч. 1: Уч. / А.Г. Схиртладзе, А.В. Чеканин, В.В. Волков. М.: Курс, 2015. 336 с.

8. Progressive Deformation Analysis in Carbon and Glass Fiber Reinforced Hybrid Composites Using Finite Element Method // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2023. Vol. 30, No. 06.

9. Poluektov M., Figiel Ł. A cut finite-element method for fracture and contact problems in large-deformation solid mechanics // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2022. Vol. 388. P. 114234.

10. Металлические конструкции: учебник для высш. уч. заведений / Ю.И. Кудишин, Е.Н. Беленя, В.С. Игнатьева под ред. Ю.И. Кудишина, М.: «Академия», 2008. 688 с.

Синелюбов Максим Алексеевич, сотрудник, rrr234ttt45@yandex.ru, Россия, Тула, ООО "ПСИ" ПРОМСТРОЙ ИНЖИНИРИНГ

ANALYSIS OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF BEAMS BY COMPUTER SIMULATION

M.A. Sinelubov

The article considers the application of computer modeling for beam shear analysis using the finite element method. The capabilities of modern software packages for creating high-precision parametric models that take into account nonlinear properties of materials and various loading conditions are analyzed. Particular attention is paid to the problem of shear in beams, which is a deformation in which adjacent layers of material are displaced relative to each other parallel to the contact plane. The classical approach to calculation is considered in detail and its limitations are noted in comparison with computer modeling. The advantages of computer modeling for analyzing deformations and predicting the failure of structures are demonstrated using the example of comparing bars of different cross-sections with the same area. The results of modeling in the software package are presented. Promising hybrid approaches to modeling that combine the finite element method with other numerical methods are discussed, and the need to verify the results of computer modeling with experimental data is emphasized.

Key words: computer modeling, finite element method, construction, structures, hybrid calculation methods, structural strength, information analysis.

Sinelubov Maxim Alekseevich, employee, rrr234ttt45@yandex.ru, Russia, Tula, OOO "PSI" promstroj inzhiniring.

УДК 004.771:004.056.52
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-387-388

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО ВЫЯВЛЕНИЯ HTTP-ТУННЕЛИРОВАНИЯ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.С. Подшибякин, О.М. Степанюк

Данная научная статья посвящена разработке и реализации метода оперативного выявления использования технологии HTTP-туннелирования в сетевом трафике информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС). В исследовании рассматриваются особенности, связанные с HTTP-туннелированием, проводится сравнительный анализ существующих методов обнаружения и предлагается новый подход, основанный на комплексном анализе сетевого трафика. Представлена практическая реализация технологии HTTP-туннелирования с использованием разработанного клиент-серверного программного комплекса, а также предложено собственное средство детектирования туннелирования с применением библиотеки Scapy. Результаты исследования демонстрируют эффективность представленного подхода в выявлении подозрительной активности и потенциальных угроз безопасности, связанных с HTTP-туннелированием.

Ключевые слова: HTTP-туннелирование, информационная безопасность, сетевой трафик, анализ пакетов, Scapy, обнаружение угроз, кибербезопасность, сетевой мониторинг, скрытые каналы передачи данных.

Среди широкого спектра угроз информационной безопасности (ИБ), таких как вирусы, фишинговые атаки и DDoS-атаки, особое место занимает проблема скрытного проникновения нарушителями ИБ в целевые ИТКС через HTTP-туннели. Техника создания и использования таких соединений позволяет скрыто передавать данные, обходя стандартные средства контроля и фильтрации сетевого трафика, что делает их популярным инструментом среди нарушителей ИБ для реализации кибератак. Более того, использование ими широко распространенных протоколов прикладного уровня, таких как HTTP (HyperText Transfer Protocol – протокол передачи гипертекста), представляет собой серьезную угрозу для безопасности корпоративных сетей, так как позволяет не только извлекать конфиденциальную информацию, но и осуществлять неконтролируемый доступ к ресурсам сети. Проблема усугубляется еще тем, что традиционные средства защиты, такие как сетевые экраны и антивирусные программы, часто оказываются неэффективными против этого типа атак из-за их скрытного характера и способности маскироваться под обычный трафик.

В свете этих обстоятельств, оперативное выявление HTTP-туннелей в информационном потоке корпоративной сети приобретает актуальность и необходимость. Цель данной статьи – разработка эффективного метода, позволяющего в реальном времени обнаруживать и блокировать попытки использования HTTP-туннелирования в сетевом трафике, что повысит общий уровень защиты ИТКС. Для достижения этой цели требуется комплексный анализ существующих методов обнаружения использования HTTP-туннелирования, определение их недостатков и разработка новых, более

эффективных технологических решений. Это включает в себя применение перспективных алгоритмов машинного обучения, методов глубокого анализа потоков данных и разработку специализированного программного обеспечения, способного оперативно реагировать на угрозы, основанные на использовании технологии HTTP-туннелирования.

Обзор технологии и особенности использования HTTP-туннелирования. HTTP-туннелирование представляет собой многофункциональную технологию, позволяющую передавать данные через корпоративные сетевые порты 80 и 443, которые обычно остаются открытыми для веб-трафика.

Основной составляющей технологии HTTP-туннелирования является использование прокси-сервера, действующего в качестве посредника между клиентом и сервером. Клиент отправляет HTTP-запросы прокси-серверу, который, в свою очередь, преобразовывает эти запросы в нужный тип трафика и передает их на целевой сервер. Ответы от сервера принимаются прокси-сервером, преобразуются обратно в формат HTTP и пересылаются клиенту. Технология HTTP-туннелирования может использоваться для различных целей, включая обеспечение конфиденциальности передачи данных с помощью шифрования. Однако такая технология может быть использована нарушителями ИБ для маскировки вредоносного потока данных и значительно усложнить процесс анализа и фильтрации трафика сетевыми мониторинговыми инструментами. Это связано с тем, что HTTP-туннелирование представляет собой механизм, который позволяет инкапсулировать протоколы и типы трафика, которые обычно не используют HTTP, в допустимые HTTP-запросы и ответы. Это достигается за счет передачи данных, которые не являются частью стандартного HTTP-трафика, через HTTP-сессии, что может оказаться полезным для обхода межсетевых экранов (firewall) или промежуточных серверов (proxy, прокси-сервер), реализующих политики фильтрации сетевого трафика.

Исходя из вышесказанного, использование HTTP-туннелирования порождает ряд проблем, значительно усложняющих процесс оперативного выявления применения данной технологии нарушителями ИБ в сетевом трафике ИТКС. Следует заметить, что одной из важных проблем является маскировка сетевого трафика. Так, используя стандартные HTTP-запросы и ответы для туннелирования, малозаметные данные могут без труда скрываться среди легитимного веб-трафика, что делает их обнаружение сложной задачей. Нарушители ИБ могут применять эти возможности для проникновения в сетевую инфраструктуру или передачи чувствительных данных [1].

Кроме того, функционирование HTTP-туннелирования может привести к увеличению нагрузки на сетевые ресурсы. Интенсивное использование туннелей для передачи больших объемов данных может вызвать замедление работы сети, тем самым уменьшая её эффективность и производительность. Выявление таких активностей требует отслеживания и анализа большого объема передаваемых данных, что, в свою очередь, может потребовать дополнительных ресурсов для транспортировки и обработки информации. Например, системы глубокого анализа пакетов (Deep Packet

Inspection, DPI) могут быть неэффективны из-за шифрования данных внутри HTTP-сессий. На рис. 1 представлен процесс атаки на корпоративную сеть с обходом средств защиты, используя HTTP-туннелирование.

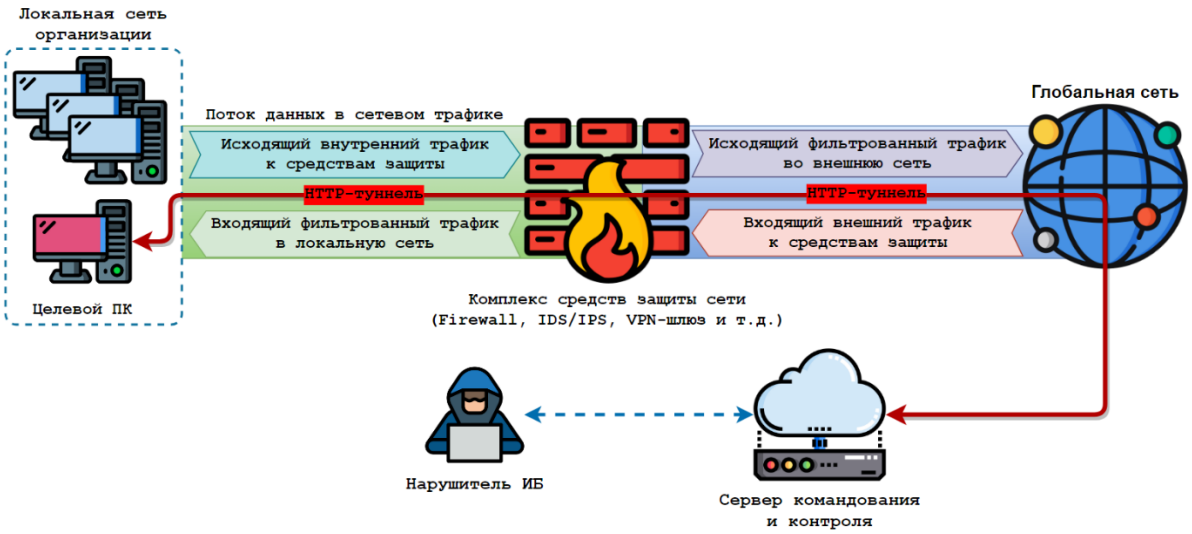


Рис. 1. Процесс атаки на корпоративную сеть с обходом средств защиты, используя HTTP-туннелирование

Безопасность является еще одной существенной проблемой при использовании HTTP-туннелирования. Хотя протокол HTTP и предполагает передачу данных по открытым каналам, наличие дополнительных слоев шифрования и обфускации в рамках туннелирования может усложнить процесс верификации и аутентификации пользователей и узлов. Таким образом, HTTP-туннелирование, несмотря на его полезность и удобство, представляет собой технологию, имеющую ряд значительных сложностей, которые необходимо учитывать при разработке методов оперативного обнаружения и нейтрализации воздействий, связанных с данным видом трафика в ИТКС.

В связи с этим, разработка метода оперативного выявления HTTP-туннелей в сетевом трафике становится необходимой и важной актуальной задачей. Это включает в себя создание эффективных алгоритмов и методов детектирования аномалий, способных распознавать нестандартные паттерны использования протокола HTTP.

Сравнительный анализ существующих методов обнаружения использования технологий HTTP-туннелирования. В рамках проведения сравнительного анализа рассмотрим основные существующие подходы и методы обнаружения использования технологий HTTP-туннелирования, их преимущества и недостатки по сравнению с предлагаемым методом оперативного выявления.

Одним из традиционных подходов является использование систем обнаружения вторжений (IDS), которые анализируют трафик на предмет аномалий или известных сигнатур атак. Эти системы, хотя и эффективны в некоторых случаях, часто не могут корректно идентифицировать HTTP-туннели, поскольку в них используются легитимные HTTP-запросы и ответы для передачи данных.

Другой подход связан с анализом глубины пакетов (DPI), который позволяет более детально изучать содержимое трафика. DPI может отличать HTTP-туннели от других видов трафика на основе анализа заголовков, временных характеристик и типичных паттернов поведения. Однако такие системы требовательны к ресурсам и могут нарушать конфиденциальность пользовательских данных.

Кроме того, применяются методы машинного обучения для классификации трафика, которые обучаются на больших объемах исторических данных для выявления потенциального использования туннелирования.

Недостатком таких подходов является сложность в сборе и обработке необходимого объема обучающих данных, а также возможные ошибки в работе обученной модели из-за изменения характеристик трафика или новых типов туннелирования.

В табл. 1 представлен сравнительный анализ основных существующих методов обнаружения использования HTTP-туннелирования с указанием их преимуществ и недостатков.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов обнаружения использования HTTP-туннелирования

№ п/п	Метод	Преимущества	Недостатки
1	Системы обнаружения вторжений (IDS)	Способны выявлять известные сигнатуры атак. Широко распространены и интегрируются в существующие инфраструктуры.	Низкая эффективность выявления применения HTTP-туннелирования из-за использования легитимных запросов. Высокий уровень ложноположительных срабатываний
2	Глубокий анализ пакетов (DPI)	Детальный анализ содержимого трафика. Возможность выявления аномалий в поведении протоколов.	Высокие требования к вычислительным ресурсам. Возможное нарушение конфиденциальности данных пользователей
3	Методы машинного обучения	Адаптивность к новым типам атак. Возможность выявления скрытых закономерностей в трафике.	Сложность сбора и обработки большого объема обучающих данных. Чувствительность к изменениям в типах трафика

Следует отметить, что независимо от выбранного метода, комплексный подход, включающий не только технологические решения, но и постоянное обновление знаний об актуальных угрозах и инструментах, обеспечит наиболее эффективную защиту ИТКС от использования технологий HTTP-туннелирования нарушителями ИБ.

Практическая реализация технологии HTTP-туннелирования. В связи с тем, что в открытом доступе существует множество инструментов для создания HTTP-туннеля [2-4], проверка работоспособности каждого из них затруднительна и нецелесообразна. Кроме того, их функциональность может не соответствовать необходимым требованиям. Поэтому авторами было принято решение разработать собственный программный комплекс на языке программирования Python, реализующий технологию HTTP-туннелирования между клиентом и сервером, что позволит провести целенаправленное исследование и анализ сетевого трафика, а также обеспечить гибкость и адаптивность инструмента под конкретные задачи исследования.

Программный комплекс, разработанный на основе анализа современных систем мониторинга компьютерных сетей, состоит из двух взаимосвязанных программ: серверной и клиентской [5]. Несмотря на их раздельную реализацию, эти программы образуют целостную систему, предназначенную для сбора, передачи и централизованного хранения информации о состоянии множества компьютерных систем в режиме реального времени.

Серверная часть программы, реализованная в файле *server-http-tunneling.py*, представляет собой веб-приложение на базе фреймворка *Flask* и обеспечивает выполнение двух ключевых задач: регистрации клиентов и приема данных. Процесс регистрации клиентов осуществляется путем сохранения уникального идентификатора клиента и его IP-адреса в оперативной памяти сервера. Механизм приема данных реализован таким образом, что программа асинхронно обрабатывает входящие POST-запросы, содержащие информацию о состоянии клиентских систем в формате JSON.

Полученные данные сервер сохраняет в файловой системе, формируя для каждого клиента отдельный JSON-файл, который пополняется при каждом новом поступлении данных. Важной особенностью серверной части программы является ее многопоточность, что обеспечивает эффективную обработку параллельных запросов от множества клиентов. На рис. 2 показан процесс работы и вывод на экран серверной части программы.

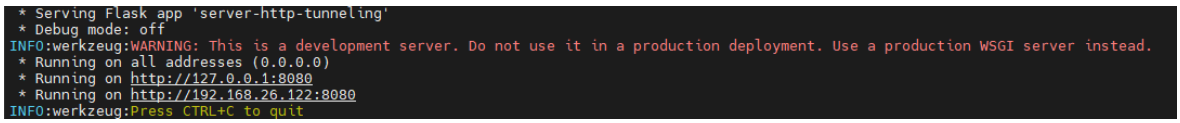


Рис. 2. Процесс работы серверной части программы

Клиентская часть программы, представленная в файле *client-http-tunneling.py*, реализует функционал сбора системной информации и ее периодической передачи на сервер. Клиент инициирует свою работу процедурой регистрации на сервере, отправляя ему свой уникальный идентификатор. Затем в отдельном потоке запускается циклический процесс сбора и отправки данных. Сбор информации осуществляется посредством системных вызовов и использования библиотеки *psutil*, что позволяет получить широкий спектр данных о состоянии системы, включая загрузку CPU, использование памяти и дискового пространства, сетевую активность, список запущенных процессов и информацию о пользователях. Дополнительно клиент собирает данные о файловой системе и выполняет команду *uname* для получения расширенной информации об операционной системе. Собранные данные сохраняются в формате JSON и отправляются на сервер посредством HTTP POST-запроса с заданной периодичностью. На рис. 3 показан процесс работы и вывод на экран клиентской части программы.

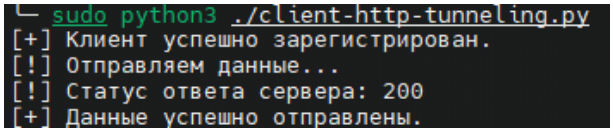


Рис. 3. Процесс работы клиентской части программы

В результате взаимодействия программ клиентской и серверной частей формируется комплексная система сбора и передачи данных, способная осуществлять непрерывный сбор, передачу и хранение детализированной информации о состоянии множества клиентских систем. На рис. 4 показано уведомление от системы о том, что клиент успешно подключён к серверу и передал информацию, которая была записана в файл (рис. 5).

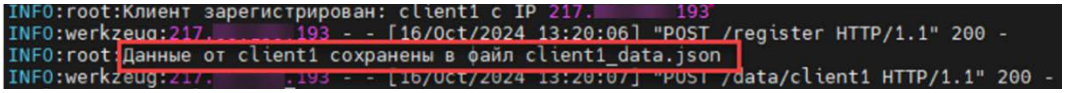


Рис. 4 Уведомление о корректном подключении клиента к серверу


```
"timestamp": "2024-10-16 14:30:42",
"hostname": "ubuntuvm",
"system": "Linux",
"release": "6.8.0-40-generic",
"version": "#40~22.04.3-Ubuntu SMP PREEMPT_DYNAMIC Tue Jul 30 17:30:19 UTC 2",
"architecture": "x86_64",
"processor": "x86_64",
"cpu_usage_percent": 0.4,
"memory_info": {
    "total": 8278142976,
    "available": 3862859776,
    "percent": 53.3,
    "used": 4079595520,
    "free": 333164544,
    "active": 2787954688,
    "inactive": 3672940544,
    "buffers": 56225792,
    "cached": 3809157120,
    "shared": 22876160,
    "slab": 533729280
```


Рис. 5. JSON-файл, содержащий информацию о клиенте

Такая архитектура системы сбора и передачи данных обеспечивает их централизованное накопление, что потенциально может быть использовано нарушителем ИБ для проведения комплексного анализа уязвимостей целевых систем. Получив доступ к серверу или перехватив передаваемые данные, атакующий может выявить паттерны в работе системы, идентифицировать слабые места в безопасности и потенциальные векторы атак на клиентские машины. Более того, нарушитель ИБ может модифицировать клиентскую программу, расширив спектр собираемой информации, включив в него, например, сбор конфиденциальных данных, ключей шифрования или учетных данных пользователей [6]. Это позволит в дальнейшем не только скомпрометировать клиентские системы, но и получить доступ к целевой инфраструктуре, потенциально используя собранную информацию для проведения направленных атак, социальной инженерии или масштабного взлома сети.

На рис. 6 представлена схема взаимодействия клиента и сервера для сбора и хранения системной информации.

На приведенной схеме (рис.5) отображены следующие этапы взаимодействия Клиент-Сервер:

1. Клиент регистрируется на сервере.
2. Сервер подтверждает регистрацию клиента.
3. Взаимодействие Клиент-Сервер входит в цикл, который повторяется каждые 60 секунд:

– клиент собирает системную информацию;
– клиент отправляет собранные данные на сервер;
– сервер обрабатывает полученные данные;
– сервер сохраняет данные в JSON файл;
– сервер отправляет подтверждение клиенту о получении данных.

4. Конечным результатом взаимодействия клиента и сервера является собранный JSON-файл, названный в соответствии с ID клиента.

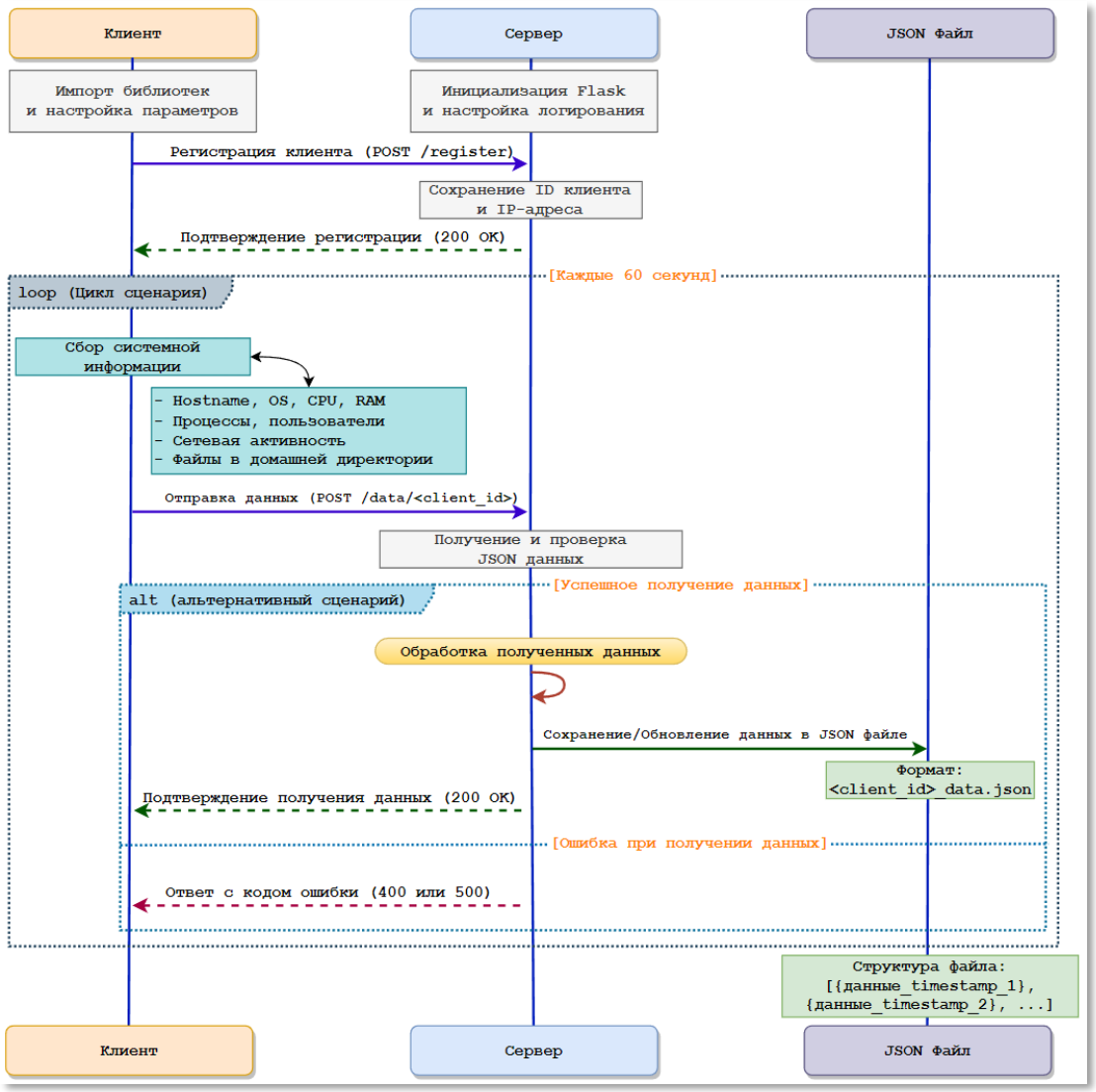


Рис. 6. Схема взаимодействия клиента и сервера для сбора и хранения системной информации

Использование HTTP-протокола для коммуникации между клиентом и сервером предоставляет нарушителю ИБ возможность легко маскировать вредоносный трафик под легитимный веб-трафик, что затрудняет его обнаружение стандартными средствами защиты. Периодичность отправки данных и асинхронность их обработки сервером позволяют атакующему осуществлять постепенное и незаметное извлечение конфиденциальной информации, минимизируя риск обнаружения. Данная реализация

взаимодействия Клиент-Сервер представляет собой гибкую основу для создания масштабируемой системы удаленного доступа и контроля, которая может быть дополнена нарушителем ИБ функциями удаленного выполнения команд, кейлоггерами, средствами перехвата сетевого трафика и другими вредоносными модулями. Это позволит атакующему не только собирать чувствительные данные, но и осуществлять полный контроль над скомпрометированными системами, создавая обширную и трудно обнаруживаемую ботнет-сеть для дальнейших кибератак или кражи данных в промышленных масштабах.

Учитывая вышеизложенные угрозы и потенциальные риски, связанные с использованием HTTP-туннелирования для нелегитимных целей, становится очевидной необходимость разработки специализированного инструментария для оперативного обнаружения и анализа подозрительного HTTP-трафика.

Представление инструмента, реализующего метод выявления использования HTTP-туннелирования. Разработанный авторами инструмент [5] реализует единый метод обнаружения использования HTTP-туннелирования посредством анализа HTTP-трафика. Этот метод объединяет несколько взаимосвязанных функциональных компонентов, которые совместно обеспечивают эффективное выявление скрытой передачи данных и попыток обхода систем безопасности.

Инструмент осуществляет перехват сетевого трафика с помощью функции *sniff* из библиотеки Scapy [7], позволяя захватывать сетевые пакеты на заданном сетевом интерфейсе. Использование TCPSession при перехвате обеспечивает реконструкцию полных TCP-сессий, что предоставляет более глубокий уровень анализа взаимодействий между сетевыми узлами.

Каждый перехваченный сетевой пакет анализируется функцией *analyze_packet*, которая проверяет наличие слоя HTTPRequest, что позволяет сосредоточиться на HTTP-запросах, выделяя их из общего потока трафика. Инструмент ведет статистику по HTTP-пакетам, отслеживая общее количество обработанных запросов и распределение по методам, таким как GET и POST. Это способствует детальному пониманию характера трафика и выявлению аномалий в использовании различных методов HTTP.

Особое внимание уделяется POST-запросам на нестандартные порты, отличные от общепринятых 80 и 443. Такие запросы могут служить индикатором попыток обхода стандартных механизмов безопасности через HTTP-туннелирование. При обнаружении подобных POST-запросов инструмент пытается декодировать их содержимое и проверить наличие данных в формате JSON, который часто используется для структурированной передачи информации в туннелях.

Если выявляется содержащий полезную нагрузку POST-запрос на нестандартный порт и обнаруживается JSON-содержимое, инструмент регистрирует это событие как потенциальный HTTP-туннель. Кроме того, дополнительно, он отслеживает частоту таких запросов от каждого источника.

Если количество запросов превышает установленный порог за определенный интервал времени (например, более пяти запросов в течение минуты), это классифицируется как подозрительная активность.

Все значимые события, включая обнаружение потенциальных туннелей и случаев повышенной активности, записываются в лог-файл *http_tunnel_detection.log*, что обеспечивает возможность последующего ретроспективного анализа и принятия мер по усилению безопасности сети.

Таким образом, представленный инструмент реализует комплексный метод глубокого анализа HTTP-трафика для обнаружения HTTP-туннелирования. Объединяя перехват, анализ содержимого запросов, мониторинг частоты и логирование событий, инструмент эффективно выявляет аномальные паттерны и способствует предотвращению скрытой передачи данных, а также обхода систем безопасности.

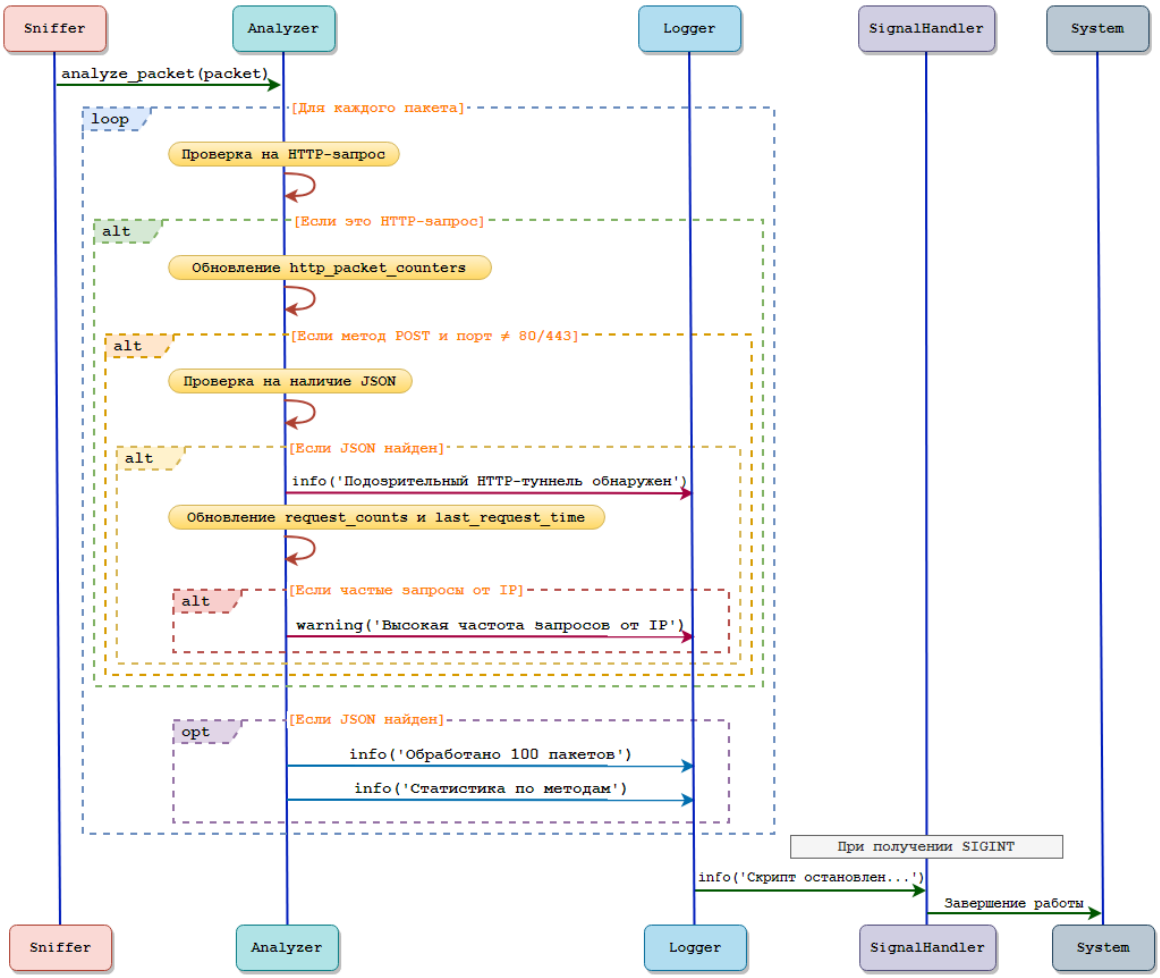


Рис. 7. Схема, отображающая последовательность действий инструмента анализа сетевого трафика

На рис. 7 представлена схема, отображающая следующую последовательность действий в функционале инструмента:

1. Sniffer-модуль перехвата сетевых пакетов, реализует функцию sniff, которая отвечает за отслеживание сетевого трафика. При перехвате сетевого пакета функция sniff вызывает функцию *analyze_packet* из модуля

Analyzer для детального анализа каждого перехваченного сетевого пакета.

2. Analyzer-модуль анализа сетевых пакетов, содержит функцию *analyze_packet*, которая проводит детальную обработку и анализ каждого пакета, выполняя следующие действия:

а) проверка типа пакета, определяющая, является ли пакет HTTP-запросом;

б) обработка HTTP-запросов (если пакет является HTTP-запросом), включающая:

– обновление статистики (обновляет счетчики HTTP-пакетов для последующего анализа трафика);

– анализ нестандартных запросов (если метод запроса – POST и порт назначения не является стандартным для HTTP/HTTPS (не 80 и не 443)) с выполнением проверки содержимого (анализирует тело запроса на наличие JSON-данных) и обнаружением возможного использования туннелирования. При обнаружении JSON-данных в нестандартном POST-запросе: логирует сообщение о возможном использовании HTTP-туннелирования; обновляет счетчики подобных запросов; фиксирует время последнего запроса; если запросы от одного IP-адреса поступают с высокой частотой, то логирует предупреждение о подозрительной активности;

в) регулярное логирование статистики (каждые 100 пакетов функция логирует информационные сообщения о количестве обработанных пакетов и предоставляет статистику по используемым HTTP-методам).

3. Logger-модуль логирования, выполняет запись результатов анализа и другой важной информации:

а) фиксация сообщений об обнаружении подозрительной активности;

б) сохранение статистических данных обработки;

в) логирование других важных событий в работе программы.

4. SignalHandler-модуль реализует функцию *signal_handler* для обработки системных сигналов:

а) обрабатывает сигнал SIGINT, генерируемый при нажатии пользователем сочетания клавиш Ctrl+C;

б) обеспечивает корректную остановку программы при получении соответствующего сигнала (позволяет безопасно завершить все процессы и сохраняет текущие данные перед завершением работы).

5. System-модуль, реализующий следующие функции:

а) обеспечение корректного завершения работы программы;

б) использование вызова *sys.exit(0)* для завершения;

в) освобождение всех ресурсов;

г) завершение работы всех модулей при остановке программы;

д) предотвращение возможных утечек памяти и других системных ошибок.

На рис. 8 продемонстрирован процесс взаимодействия между клиентом и сервером, а также показаны результаты работы представленного инструмента по мониторингу и выявлению скрытой передачи данных (использование HTTP-туннелирования).

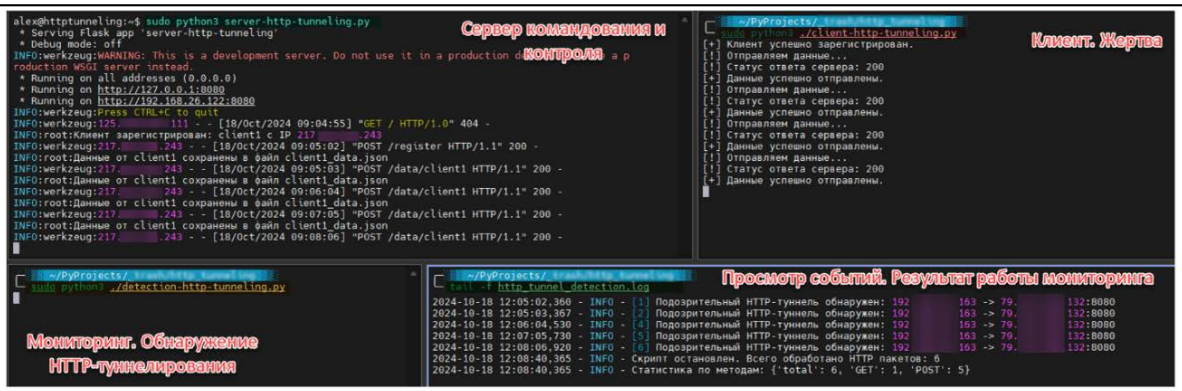


Рис. 8. Демонстрация взаимодействия между клиентом и сервером с мониторингом процессов

Таким образом, разработанный авторами инструмент позволяет эффективно обнаруживать и анализировать попытки использования HTTP-туннелирования и является полезным средством для специалистов по информационной безопасности. Его внедрение может значительно повысить уровень защищенности сетевой инфраструктуры и содействовать предотвращению утечек данных, а также других многочисленных киберугроз, связанных с использованием скрытых каналов передачи информации.

Заключение. В процессе исследования подчеркнута важность увеличения эффективности обнаружения несанкционированного доступа и нелегитимной передачи данных через сетевые коммуникации. Авторами был разработан и успешно апробирован метод оперативного выявления технологии HTTP-туннелирования в сетевом трафике ИТКС. Результаты экспериментов показали, что разработанный на основе представленного метода инструмент анализа сетевого трафика обладает высокой чувствительностью и специфичностью, что делает его весьма перспективным для дальнейшего развития и интеграции в существующие системы обеспечения сетевой безопасности.

Однако, несмотря на достигнутые успехи, работа по совершенствованию подходов к детектированию HTTP-туннелей требует продолжения. Использование статистического анализа и алгоритмов машинного обучения способствует повышению точности выявления HTTP-туннелей, что доказывает важность применения современных технологических подходов в области информационной безопасности. Необходимо сосредоточить усилия на дальнейшем улучшении внедряемых методов и алгоритмов, а также повышении скорости обработки данных в реальном времени. Это особенно важно в контексте постоянно эволюционирующих киберугроз и увеличения объема сетевого трафика.

Список литературы

1. SecurityLab. Sensitive Information. [Электронный ресурс] URL: https://www.securitylab.ru/glossary/sensitive_information (дата обращения: 14.10.2024).

2. GitHub - anderspitman/awesome-tunneling: List of ngrok/Cloudflare Tunnel alternatives and other tunneling software and services. Focus on self-hosting. [Электронный ресурс] URL: https://github.com/anderspitman/awesome-tunneling (дата обращения: 15.10.2024).

3. Best Ngrok Alternatives for Tunneling (Free & Paid). [Электронный ресурс] URL: https://www.regendus.com/best-ngrok-alternatives (дата обращения: 16.10.2024).

4. Top 10 Ngrok alternatives in 2024. [Электронный ресурс] URL: https://pinggy.io/blog/best_ngrok_alternatives (дата обращения: 16.10.2024).

5. GitLab. Alexander / HTTP Tunneling Detection System · GitLab. [Электронный ресурс] URL: https://gitlab.uno/alex/http-tunneling-detection-system (дата обращения: 16.10.2024).

6. Степанюк О.М., Подшибякин А.С., Соловьева М.В. Особенности функционирования PAM-модулей в операционной системе Linux и обнаружение вредоносного программного обеспечения при использовании технологии eBPF // Технологии, алгоритмы и программы решения прикладных задач кибербезопасности, помехозащищенности и информационного обеспечения. Выпуск 6 (40). СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2023. С. 9-17.

7. Scapy. Manipulate packets. [Электронный ресурс] URL: https://scapy.net (дата обращения: 17.10.2024).

Степанюк Орест Михайлович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Подшибякин Александр Сергеевич, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A METHOD FOR THE RAPID DETECTION OF HTTP TUNNELING IN THE NETWORK TRAFFIC OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

O.M. Stepanyuk, A.S. Podshibyakin

This scientific article focuses on the development and implementation of a method for the operational identification of HTTP tunneling technology used in the network traffic of information and telecommunication systems. The study examines the characteristics of HTTP tunneling and conducts a comparative analysis of existing detection methods. A new approach based on the comprehensive analysis of network traffic is proposed, which can be used to detect suspicious activity and potential security threats. The practical implementation of the developed client-server software package for HTTP tunneling is presented, along with a proprietary tunneling detection tool based on the Scapy library. The results of the research demonstrate the effectiveness of this approach in identifying potential security risks associated with HTTP tunneling.

Key words: HTTP tunneling, information security, network traffic analysis, packet analysis, Scapy, threat detection, cybersecurity, network monitoring, hidden data transmission channels.

Stepanyuk Orest Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, senior research associate of the research laboratory, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, A.F. Mozhaisky Military Space Academy,

Podshibyakin Alexander Sergeevich, researcher at the research laboratory, Russia, St. Petersburg, A.F. Mozhaisky Military Space Academy

УДК 681.787:628.955.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-399-400

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО МИКРОЭЛЕМЕНТА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ФОЛЬГИ РОДИЕВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ УСТАНОВКОЙ

Е.Е. Майоров, Ю.М. Бородянккий, Р.Б. Гулиев, А.В. Дагаев, И.С. Таюрская

В работе рассмотрена возможность применения экспериментальной интерференционной установки для исследования отражающей поверхности плоского микроэлемента на основе фольги родиевой, применяемого в системах зеркальной оптики. Современные интерференционные методы и средства способны проводить высокоточные и достоверные измерения для решения ряда сложных задач, роль которых с каждым днем стремительно растет, поэтому данная работа перспективна. В работе приведена оптическая схема экспериментальной установки и технические характеристики. Получены размах и среднеквадратическое отклонение в микрометрах, а также распределение коэффициента отражения в двух направлениях x и y для отражающей поверхности.

Ключевые слова: плоский микроэлемент, интерференционная установка, коэффициент отражения, длина волны излучения, исследуемая поверхность, фольга родиевая, размах, среднеквадратическое отклонение.

Научные исследования тогда и только тогда себя оправдывали, когда речь шла об высокоточных, достоверных и надежных измерениях [1]. В наши дни без измерений сложно познавать материальный мир его природу возникновения [2]. Исследователи активно изучают различные процессы в научно-практических направлениях, что ведет к появлению новых методов и технических средств в научной базе исследований [3]. В настоящее время проводятся эксперименты не только над природными явлениями, но и над искусственно созданными человеком материалами и процессами [4].

Существуют методы и технические средства измерений, которые подразделяются на контактные и бесконтактные [5]. Многие производители измерительной техники применяют контактные методы в различных электронно-механических приборах и комплексах для выявления чистоты (шероховатости) поверхности изготовленных деталей. Эти приборы и комплексы способны измерять микрорельеф поверхности изучаемых объектов с точностью до 0,01 мкм [6]. Работа соответствующих приборов основана на анализе данных поверхности передающим чувствительным элементом (механическим щупом). До сих пор многие производители механических (клиновидных, кулачковых механизмов), электротехнических (статоры, подшипники), оптических используют механические приборы и комплексы «Carl Zeiss» для контроля поверхности изготовленной детали [7].

Специалисты, эксплуатируя данное оборудование, отмечают высокую точность измерений, безотказную, надёжную работу этих комплексов. Однако, несмотря на их достоинства существуют проблемы в измерении микрорельефа поверхности объектов с малой устойчивостью, быстрый выход из строя чувствительного элемента, который имеет высокую стоимость, а динамические измерения вообще проводить нельзя [8]. При эксплуатации этих измерительных средств наблюдалась низкая производительность, влияние вибраций в реальных условиях на результат измерений и узкий класс контролируемых поверхностей [9].

Представленные выше проблемы можно устранить бесконтактным методом контроля, который реализован в конструкциях оптико-электронных приборах и комплексах. Значимую нишу в этих приборах и комплексах занимают автоматизированные оптико-электронные интерференционные средства измерений (АОЭИСИ) в силу своей высокой точности, чувствительности [10]. Данные АОЭИСИ предназначены для определения качества поверхности объектов не только высоко полированных изделий из металла, пластика, керамики, но и элементов оптических систем линзовой и зеркальной оптики. Принцип работы АОЭИСИ заключается в выявлении параметров, характеризующих поверхность исследуемого объекта посредством детального анализа излучения, отраженного от контролируемой поверхности [11].

Проведя теоретическое исследование данного вопроса пришли к следующему выводу: при измерении оптических поверхностей выпуклых, вогнутых и плоских форм возможно применять теневой метод Фуко, метод Гартмана, Тваймана, интерференционные методы с применением интерферометра Физо, Линника, а также дифракционного интерферометра [12]. В теневом методе появляются ошибки в системах, в методе Гартмана по гартмограммам выявляются аберрации больших значений, интерферометр Тваймана сильно подвержен вибрациям, что влияет на точность измерений. Все эти недостатки исключает интерферометр Физо, и у него существует один недочет: чувствительность интерферометра ограничена конструкцией эталона [13]. Все конструкции традиционных интерферометров контроля поверхности, таковы что при создании опорного волнового фронта участвует эталон с определенным ограничением точности.

В процессе изучения методов контроля оптических поверхностей изделий универсальным подходом является использование интерферометра с дифракционным опорным волновым фронтом. Достоинства данного подхода исключает эталон оптической поверхности, отсутствует поперечная расфокусировка, интерференционные поля высокого качества и не зашумленны [14].

Поэтому представляет интерес изучение поверхности плоского зеркального микроэлемента на основе фольги радиевой, применяемого в оптических системах современных оптико-электронных приборах и комплексах экспериментальной интерференционной установкой, где в качестве эталона используется сферический волновой фронт, полученный в результате дифракции на отверстии диаметром 1 мкм.

Цель работы состояла в получении параметров оптической поверхности экспериментальной оптической установкой и оценить качество поверхности изделия.

Постановка задачи. С помощью экспериментальной интерферометрической установки исследовать плоский отражательный микроэлемент оптической системы на основе фольги родиевой. Получить размах и среднеквадратическое отклонение в микрометрах, а также зависимость коэффициента отражения от перемещения исследуемого образца по координатам *x* и *y*.

Объекты и метод исследования. Материалом для исследования была плоская отражающая поверхность микроэлемента использующего в оптических системах разного назначения с размерами 3 мм × 3 мм. Материал образца однородный и термически устойчивый.

С помощью экспериментальной интерферометрической установки исследовалась поверхность образца, оптическая схема которой представлена на рисунке 1.

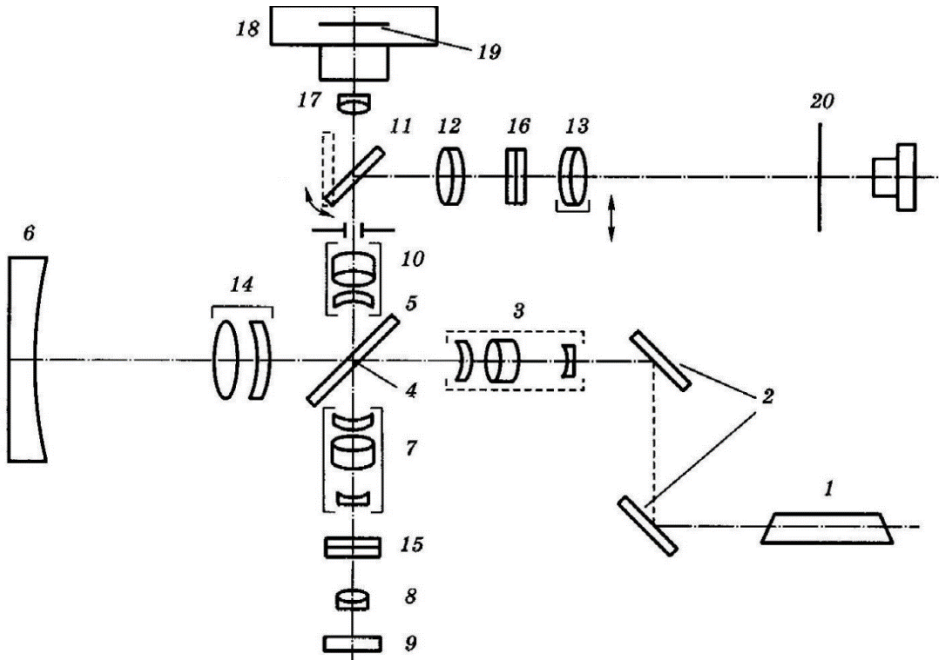


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки: 1- источник излучения; 2 – зеркала; 3 – расширитель излучения; 4 – отверстие; 5 – зеркальный элемент с отверстием; 6 – объект; 7 – объектив коллиматора; 8 – линза; 9 – зеркало; 10 – объектив с диафрагмой; 11 – светоделитель; 12 – линза; 13 – линза Бертрана; 14 – окуляр; 15, 16 – поляризационные пластины; 17 – проекционная линза; 18 – фотокамера; 19 – плоскость регистрации; 20 – плоскость изображения

Излучение от когерентного источника 1 (ЛГ-79-1 – He-Ne лазер с λ = 0,63 мкм, P = 15 мВт), пройдя расширитель 3, доставляется на зеркальный элемент с точечным отверстием 5. Отверстие 4 находится на одной оси с

центром плоской поверхности исследуемого объекта 6. Для наблюдения интерференционной картины дополнительно вводится линза Бертрана 13. Для регистрации интерференционного поля устанавливается фотокамера 18.

Технические характеристики установки:

– погрешность измерений – 0,02·λ;

– пределы перемещения установки по 3-м осям, мм – ± 10;

– фотоприемное устройство – «Nikon»;

– источник света – лазер ЛГ-79-1;

– длина волны излучения, мкм – 0,63;

– габаритные размеры, мм – 750×450×550.

Экспериментальные результаты. На экспериментальной установке была получена интерференционное поле плоской поверхности зеркального микроэлемента оптической системы. На рисунке 2 приведено интерференционное поле. Для получения информации о фазе волнового фронта, микрорельефе плоской поверхности применяли специально разработанную программу сбора, обработки и передачи информации о параметрах поверхности.

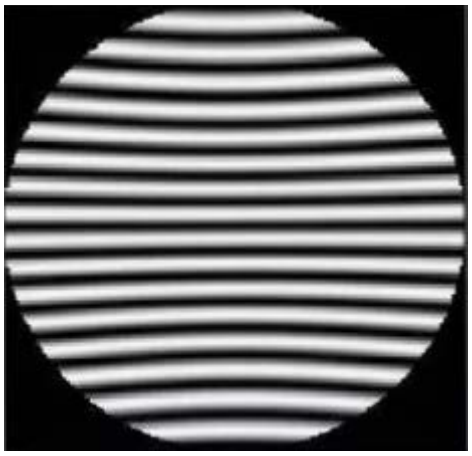


Рис. 2. Запись интерференционного поля плоской поверхности зеркального микроэлемента оптической системы

Данное программное обеспечение позволяло выявлять массив данных о пространственной фильтрации и определению черных и белых полос. В основу программного обеспечения входили полиномы Цернике, которые позволили получить данные о смещении поверхности, а также об отклонении волнового фронта световой волны. В результате получили величину размаха (R) и среднеквадратическое отклонение (σ) в микрометрах.

Для плоской зеркальной поверхности на основе фольги родиевой:

$$R = 0{,}030532 \text{ мкм}, \ \sigma = 0{,}01032 \text{ мкм}.$$

Плоскопараллельная поверхность контролировались экспериментальной установкой с точностью не хуже 0,02 λ.

Полученные результаты показывают, что измеренная плоская поверхность зеркального микроэлемента на основе фольги родиевой высокого качества и использование таких микроэлементов в оптических системах оптико-электронных приборов и комплексов будет целесообразно.

С помощью другой компьютерной программы и переюстировки измерительной установки были проведены измерения отражательной способности поверхности. В эксперименте получили зависимости коэффициента отражения от перемещения исследуемого образца по координатам *x* и *y*. Шаг измерений был равным 50 мкм в обоих направлениях.

На рисунке 3 представлены экспериментальные данные.

Графические зависимости показывают, что распределение коэффициента отражения не имели всплесков и провалов. Значения коэффициента отражения находились в диапазоне 97…99%. Это означает, что плоская поверхность отражательного микроэлемента на основе фольги родиевой имеет высокую отражательную способность.

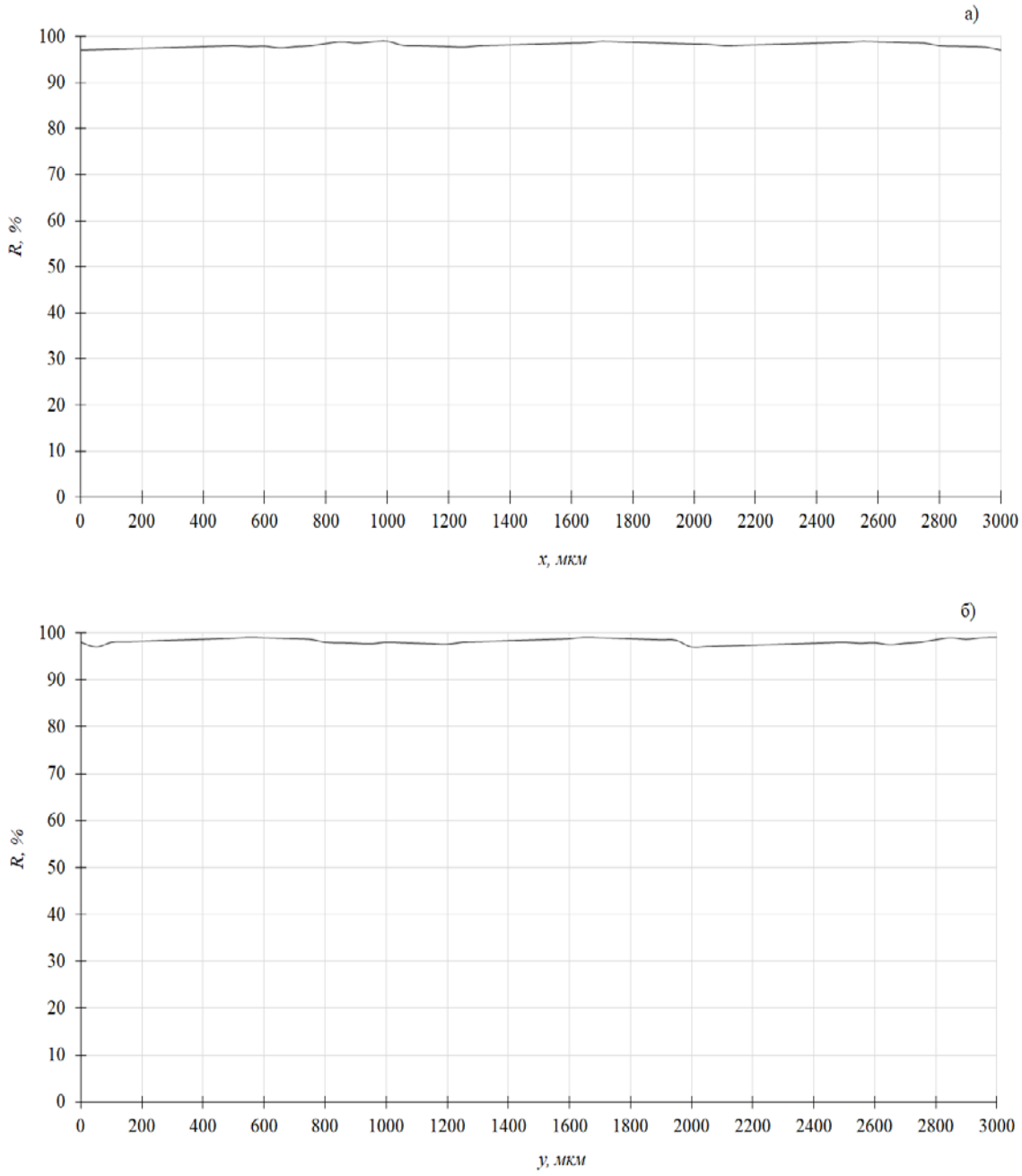


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от перемещения исследуемой поверхности: а - по координате x; б - по координате y

Заключение. В работе получены зависимости коэффициента отражения от перемещения исследуемого образца по координатам *x* и *y*, а также записано интерференционное поле высокого качества и рассчитан размах и среднеквадратическое отклонение. Экспериментальные результаты могут представлять интерес для производителей оптической аппаратуры и изделий микрооптики.

Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. 1970. 855 с.

2. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука. 1976. 926 с.

3. Малакара Д. Оптический производственный контроль: пер. с англ. под ред. Соснова А.Н. М.: Машиностроение. 1985. 340 с.

4. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение. 1987. 264 с.

5. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра. 1968. 263 с

6. Левин Б.М. Оптические методы определения характера профиля поверхностей // ОМП. 1938. №10 – 11. С. 37 – 41.

7. Курлов В.В., Коцкович В.Б., Майоров Е.Е., Пушкина В.П., Таюрская И.С. Экспериментальное исследование разработанной интерференционной системы для измерений поверхности объектов сложной формы // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 8. С. 179-189.

8. Цыганкова Г.А., Майоров Е.Е., Черняк Т.А., Константинова А.А., Машек А.Ч., Писарева Е.А. Исследование разработанного интерферометра поперечного сдвига для настройки интерференционных полос при обработке интерферограмм // Приборы. 2021. № 2. С. 20-25.

9. Хохлова М.В., Дагаев А.В., Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Громов О.В. Исследование оптико-электронной системы при обработке голографических пластин // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 8 (110). С. 103-108. DOI: 10.23670/IRJ.2021.110.8.015.

10. Хохлова М.В., Дагаев А.В., Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Громов О.В. Интерференционная система измерения геометрических параметров отражающих поверхностей // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 6 (108). С. 184-189. DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.029.

11. Костин Г.А., Баранов Н.Е., Майоров Е.Е. Применение метода дифракционной интерферометрии для контроля внешнего стекла иллюминатора салона летательного аппарата // Вестник Санкт-Петербургского Государственного Университета Гражданской Авиации. 2024. № 4. С.85-93.

12. Kirillovsky V.K. Diffraction Reference Wavefront Laser Interferometer. // SPIE. The International Society for Optical Engineering Proceed. «Miniature and Microoptics: Fabrication and System Applications». 1992. Vol. 5. (1751). P. 197-200.

13. Kyeong-Hee Lee, Voznesensky N.B., Kirillovsky V.K. Principle of certification of high precision optical parts and systems based on diffraction interferometer. Proceedings of The First Scientific Workshop-Presentation «Optical Micro- and Nanotechnologies (OmaN-1)». 2002. С. 32-40.

14. Майоров Е.Е., Курлов В.В., Бородянский Ю.М., Дагаев А.В., Таюрская И.С. Интерферометрия, как высокоточный инструмент для контроля оптических элементов прецизионной оптики // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 11. С. 192-196. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-192-193.

Майоров Евгений Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, majorov_ee@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Бородянский Юрий Михайлович, канд. техн. наук, доцент, borodyanskyum@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

Гулиев Рамиз Балахан оглы, канд. техн. наук, доцент, ramiz63@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Дагаев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, adagaev@list.ru, Россия, Ивангород, Ивангородский гуманитарно - технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения,

Таюрская Ирина Соломоновна, канд. экон. наук, доцент, tis_ivesep@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики

INVESTIGATION OF A FLAT MICROELEMENT OF A FOIL-BASED OPTICAL SYSTEM BY A RHODIUM EXPERIMENTAL INTERFERENCE SYSTEM

E.E. Maiorov, Y.M. Borodyansky, R.B. Guliyev, A.V. Dagaev, I.S. Tayurskaya

The paper considers the possibility of using an experimental interference setup to study the reflective surface of a flat microelement based on rhodium foil used in mirror optics systems. Modern interference methods and tools are capable of carrying out highly accurate and reliable measurements to solve a number of complex tasks, the role of which is growing rapidly every day, therefore this work is promising. The paper presents an optical scheme of the experimental setup and technical characteristics. The range and standard deviation in micrometers are obtained, as well as the distribution of the reflection coefficient in two directions x and y for the reflecting surface.

Key words: flat microelement, interference installation, reflection coefficient, radiation wavelength, surface under study, rhodium foil, range, standard deviation.

Maiorov Evgeny Evgenievich, candidate of technical sciences, docent, majorov_ee@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Borodyansky Yuriy Mihailovich, candidate of technical sciences, docent, borodyanskyum@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,

Guliyev Ramiz Balahan oglu, candidate of technical sciences, docent, ramiz63@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Dagaev Alexsander Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, adagaev@list.ru, Russia, Ivangorod, Ivangorodskii Humanitarian-Technical Institute (branch of) Saint-Petersburg University of Aerospace Instrumentation,

Tayurskaya Irina Solomonovna, candidate of economic sciences, docent, tis_ivesep@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg University of management technologies and Economics

УДК 004.89
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-406-407

ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ВОПРОСНО-ОТВЕТНОЙ СИСТЕМЫ, ПОСТРОЕННОЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В.В. Тельбух, П.А. Глыбовский, А.С. Гудков; И.А. Ратушняк

Работа посвящена созданию интеллектуальной вопросно-ответной системы функционирующей на основе применения нейронных сетей. Анализ научно-практического задела в данной области позволил выдвинуть гипотезу, что использование архитектуры BLSTM может значительно повысить показатели точности и релевантности ответов вопросно-ответной системы по сравнению с другими архитектурами нейронных сетей в условиях ограничения ресурсных возможностей ЭВМ. Результаты экспериментов показали, что благодаря своей двунаправленной архитектуре и возможности оптимизации гиперпараметров, BLSTM демонстрирует лучшую производительность, точность и достоверность предсказания в сравнении с такими моделями как RNN, LSTM, GRU.

Ключевые слова: вопросно-ответные системы, нейронные сети, модели машинного обучения, искусственный интеллект.

Актуальность исследования. Обработка естественного языка (ОЕЯ) является одной из ключевых областей исследований, связанных с применением технологий искусственного интеллекта. В данном направлении наблюдается значительный прогресс благодаря внедрению методов машинного и глубокого обучения. В частности, долгосрочная краткосрочная память (LSTM) и двунаправленная долгосрочная краткосрочная память (BLSTM, – Bi-directional Long Short-Term Memory) продемонстрировали высокую эффективность в создании вопросно-ответных систем (QAS), которые находят широкое применение в таких областях, как корпоративное обучение, медицинская диагностика, электронная коммерция, а также в различных потребительских сервисах [1].

Несмотря на существенные достижения в задачи по разработки QAS существует множество нерешенных проблем, одной из которых является способность системы правильно интерпретировать множество возможных формулировок одного и того же вопроса. Вопросно-ответные системы должны уметь выявлять и учитывать различные способы выражения одного и того же запроса, что представляет собой проблему даже для современных алгоритмов. Кроме того, сложность заключается в необходимости обеспечения высокой точности и релевантности ответов, особенно в контексте специализированных тем и областей знаний, где требуется глубокое понимание предметной области [2]. Также важными аспектами QAS систем являются производительность и масштабируемость. Решения на базе BLSTM чаще всего требуют значительных вычислительных ресурсов, что может ограничивать их применение в реальных условиях [3]. Оптимизация работы этих систем является важной задачей. Таким образом, выдвигаемая гипотеза, в рамках проводимых исследований, направлена на решение части существующих проблем путем внедрения более эффективных методов на базе применения BLSTM для QAS. Разработка и применение модели BLSTM для систем QAS обосновывается способностью данной архитектуры эффективно обрабатывать и интерпретировать сложные языковые структуры в условиях ограничения ресурсных возможностей ЭВМ.

Цели и задачи исследования. Цель исследования заключается в определение результативности использования нейронной сети типа BLSTM для создания интеллектуальных вопросно-ответных систем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить несколько ключевых задач. Прежде всего следует разработать модель вопросно-ответной системы, основанной на архитектуре BLSTM. Этапы ее разработки включают выбор и подготовку данных, настройку параметров модели и обучение нейронной сети на больших объемах текстовых данных. Далее необходимо будет провести серию экспериментов для оценивания эффективности разработанной модели.

Анализ научно-практического задела. В последние годы исследовательское сообщество в области искусственного интеллекта проявило значительный интерес к разработке QAS. Одним из ранних подходов, предшествовавших современным моделям глубокого обучения, были системы, основанные на индексированном поиске и правилах [4]. Поиск релевантных ответов осуществлялся на основе потока ключевых слов или фраз в предопределенном наборе данных. Главными недостатками таких систем являются: слабая масштабируемость, неточности и ошибки ответов. С развитием машинного обучения акценты разработки QAS сместились в сторону нейронных сетей [5]. Важным прорывом стал метод моделирования последовательных данных, основанный на применении рекуррентных нейронных сетей (RNN), которые способны обрабатывать последовательности слов и учитывать порядок их появления. Однако в стандартных RNN имеются проблемы исчезающего градиента, что отрицательно сказывается на эффективности обработки длинных текстов [6]. В этом контексте огромное значение

приобрела архитектура LSTM и, впоследствии, BLSTM, которая обеспечивает сохранение важной информации в больших текстах.

Многообещающей стратегией для проектирования QAS стало использование трансформеров, в том числе таких моделей, как BERT и GPT. BERT также основывается на би-директивной природе, что делает его мощным инструментом для понимания текста и генерации ответов на вопросы [7]. Однако необходимо отметить, что обе архитектуры являются требовательными к объемам и качеству обучающих данных, а также вычислительным ресурсам.

Традиционные RNN и простые LSTM показали себя не лучшим образом в задачах, требующих глубокого анализа контекста [7]. В отличие от них BLSTM обладает уникальной возможностью учитывать контекст как прошлой, так и будущей информации, что значительно увеличивает точность и релевантность ответов. Одним из ключевых преимуществ BLSTM является способность работать с длинными последовательностями текста, эффективно сохраняя и используя контекст на большом «расстоянии», что может быть существенно важно в задачах, требующих понимания сложных зависимостей, например, в юридических документах или научных статьях. Исследования, проведенные исследовательской группой из Университета Токио в 2017 году [8], наглядно демонстрируют, что BLSTM превосходит обычные LSTM и другие рекуррентные подходы в задачах машинного перевода и классификации текста.

В отличие от сверточных нейронных сетей (CNN), которые хорошо работают с задачами распознавания образов и менее эффективны в обработке текстовых данных, BLSTM функционально лучше приспособлена для решения подобных задач, для которых содержание и контекст имеют критически важное значение [9].

В сравнении с обычными рекуррентными нейронными сетями (к примеру – RNN), BLSTM практически не имеет проблемы градиентного затухания, что позволяет ей более эффективно обучаться на длинных последовательностях данных и исключать потерю важной информации [10].

Таким образом, предполагается, что применение BLSTM в QAS может позволить создавать более точные и контекстно осознанные системы, которые значительно улучшат качество взаимодействия с пользователями, предоставляя им релевантные и точные ответы на их вопросы.

Постановка задача исследования на примере реализации вопросно-ответной системы на основе BLSTM. Предположим, что использование архитектуры BLSTM позволит значительно повысить показатели точности и релевантности ответов вопросно-ответной системы по сравнению с другими архитектурами нейронных сетей. Для проверки гипотезы необходимо разработать несколько экспериментальных сценариев, включающих сравнение BLSTM с другими архитектурами, такими как обычные LSTM (Long Short-Term Memory), CNN (Convolutional Neural Networks), и более простыми моделями, такими как BOW (Bag-of-Words). Каждая из моделей будет обучаться и тестироваться на одинаковых данных, что позволит

объективно сопоставить их результаты и понять в каких случаях BLSTM проявляет свои сильные стороны, а где требует дополнительной оптимизации. Оценивание результатов будет проводиться с использованием стандартных метрик точности и полноты (precision, recall, F1-score), а также дополнительных качественных оценок, таких как субъективное восприятие пользователями качества ответов.

Для обеспечения равных минимальных условий для обучения и работы нейросетевых моделей заданы следующие аппаратные вычислительных возможностей ЭВМ: ЦПУ — 8 ядер с тактовой частотой не менее 3.0 ГГц; ОЗУ — 32 ГБ для обработки больших массивов данных; GPU — NVIDIA с архитектурой Ampere или более новой, с минимум 8 ГБ видеопамяти; жесткий диск — SSD с объемом не менее 1 ТБ для обеспечения быстрой загрузки данных; блок питания — мощностью не менее 750 Вт для стабильной работы системы. Данные параметры обеспечивают достаточную вычислительную мощность и производительность для обучения сложных моделей машинного и глубокого обучения.

Формирование обучающих данных и их обработка. Для успешного создания интеллектуальной вопросно-ответной системы, критически важным аспектом является выбор и подготовка данных для обучения [11]. Входные данные должны представлять собой набор вопросов и соответствующих ответов, обеспечивая разнообразие тематик и соответствующих формулировок. Как правило, данные для обучения извлекаются из различных источников, таких как датасеты с общедоступными вопросами и ответами, форумы, вики-страницы или специализированные базы знаний. Разноплановое тематическое содержание также играет важную роль, так как позволяет обогатить обучающую выборку, тем самым повысить способность QAS генерировать релевантные ответы на сложные или узконаправленные вопросы. В рамках проведенных исследований были собраны базы данных по следующим тематическим классам: политика (2,4 Гб.), развлечения (2,3 Гб.), религия (2,5 Гб.), история (2,4 Гб.), спорт (2,2 Гб.).

Следующим этапом после выбора данных является их очистка и аннотация. Очистка данных включает в себя удаление избыточных и нерелевантных записей, корректировку орфографических и грамматических ошибок, а также устранение других возможных искажений, способных повлиять на качество итоговой модели. Важной частью подготовки данных является нормализация текста, которая включает в себя приведение всех записей к единому стандартизированному формату: унификация регистра, устранение лишних пробелов и особенно, токенизация – процесс разделения текста на отдельные компоненты (слова, выражения и знаки препинания). Аннотация данных также играет важную роль в связи с тем, что позволяет обозначить в тексте важные лексические единицы (метки, временные интервалы, отношения между объектами и т.д.) и индикацию структурных компонентов текста, таких как вопросы и соответствующие ответы [12].

Финальная стадия подготовки данных перед обучением модели включает в себя создание обучающих и тестовых выборок. Данные разбиваются на тренировочную, валидационную и тестовую части, следуя определенным пропорциям (например, 80%, 10% и 10% соответственно) [13].

Процесс обучения модели начинается с инициализации ее параметров, после чего происходит этап итеративного обновления весов через алгоритм обратного распространения ошибки на множестве циклов «эпох». Во время каждой эпохи производится обработка тренировочных данных и корректировка параметров модели с использованием стохастического градиентного спуска или его разновидностей.

Обучение и настройка параметров модели BLSTM. После подготовки данных следует этап непосредственно обучения модели BLSTM. Обучение модели начинается с настройки параметров, включающих количество слоев, размерность скрытых слоев, обучающие коэффициенты, функции активации и регуляризацию. Начальное состояние параметров было выбрано на основании предварительных экспериментов и рекомендаций, исходя из результатов проведенных исследований [14]. Выбор количества слоев и размерности скрытых слоев основан на необходимости балансировать между сложностью модели и возможностью обобщения. Например, большое количество слоев может привести к проблемам переобучения, в то время как слишком малого количества слоев может не хватить для адекватного моделирования сложных зависимостей в данных. Для нашей модели оптимальным было использование двух слоев BLSTM с размерностью скрытых слоев в 128 единиц. Коэффициент обучения был установлен на 0.001, по рекомендации для глубоких нейронных сетей [15]. Для активации была выбрана функция ReLU (Rectified Linear Unit), которая хорошо подходит для моделей с глубокими слоями, обеспечивая быстрое обучение и устранение исчезающих градиентов. Также была внедрена L2-регуляризация для предотвращения переобучения и обеспечения лучшей обобщающей способности модели.

Обучение модели BLSTM стало следующей задачей. Перед началом обучения, данные были подвергнуты процессам предобработки, включая очистку, нормализацию и токенизацию текста. Разделение данных на обучающую и валидационную части осуществлялось в пропорции 80/20, чтобы обеспечить достаточный объем для тренировки и для последующей проверки эффективности модели.

Обучение начинается с инициализации весов и постепенного их обновления через процесс обратного распространения ошибки (backpropagation), оптимизируя функцию потерь. Один из ключевых аспектов данного этапа — это управление переобучением (overfitting) и недообучением (underfitting). Переобучение происходит, когда модель начинает слишком точно запоминать данные из тренировочного набора до такой степени, что теряет способность обобщать на новых данных. Для борьбы с этим применяются методы регуляризации, такие как dropout, а также используются методы ранней остановки (early stopping), которые прекращают обучение, как только точность на валидационном наборе начинает снижаться.

Весь процесс обучения состоял из нескольких десятков эпох, где на каждой итерации модель настраивала свои параметры, минимизируя ошибку предсказания. Кроме того, валидация на каждом этапе позволяла отслеживать переменные, такие как потери и точность.

Процесс настройки гиперпараметров, включая скорость обучения, оказался ключевым для достижения оптимальных результатов. Используя методы кросс-валидации, стало возможным найти параметры, которые обеспечили адекватную скорость обновления весов модели. (рис. 1). По данным составленного графика можно сделать вывод, что обучения модель BLSTM занимает меньше времени относительно других моделей.

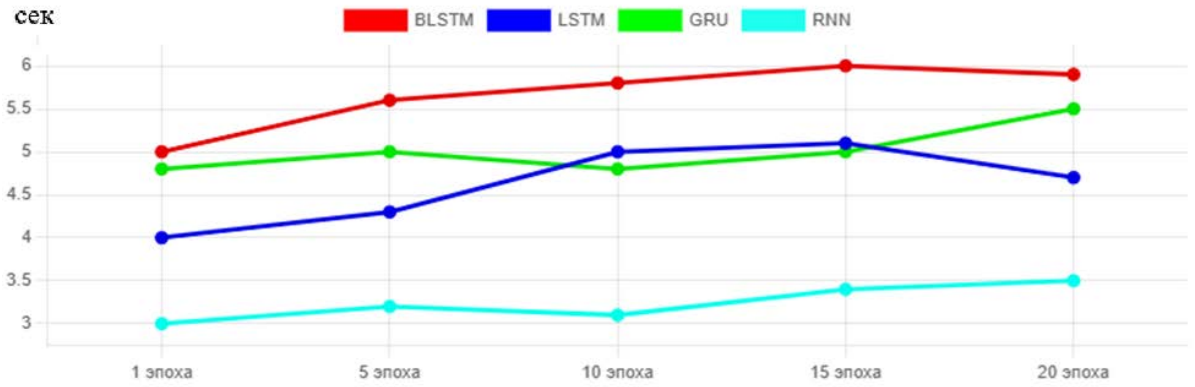


Рис. 1. График скорости обучения данных на разных эпохах

Итоговая модель была протестирована на независимой тестовой выборке, показав высокую точность и более чем приемлемые значения F-меры.

Сравнительный анализ качества разработанной модели BLSTM с другими архитектурами нейронных сетей. Для оценивания эффективности разработанной модели BLSTM в сравнении с другими, рассматриваемыми в исследовании, была проведена серия экспериментов с использованием различных наборов данных и метрик. Первоначально был подготовлен набор данных, содержащий вопросы и ответы, собранные из различных источников, включая специализированные базы данных для задач обработки естественного языка (NLP). Цель эксперимента заключалась в том, чтобы оценить, насколько точно модель BLSTM может сформировать корректные ответы на заданные вопросы.

В качестве базового сравнения использовалось несколько других архитектур нейронных сетей: долгая краткосрочная память (LSTM), ячейка с управляемыми воротами (GRU, – Gated Recurrent Unit) и рекуррентные нейронные сети (RNN). На начальных этапах экспериментов проводилась проверка модели BLSTM на учебном наборе данных. Для проверки на корректность предсказаний использовались метрики, такие как точность (accuracy и precision), полнота (recall) и F1-score. В дальнейшем были проведены сравнительные тесты на собранных 5 дата сетах с другими моделями (таб. 1-5).

Таблица 1

Оценки качества работы нейронных сетей на наборе данных «Политика»

	Accuracy	Precision	recall	F1
RNN	0.74489	0.70123	0.65512	0.67642
LSTM	0.79672	0.75463	0.80345	0.77877
GRU	0.92863	0.74321	0.78345	0.76276
BLSTM	0.97783	0.78345	0.85023	0.81589

Таблица 2

Оценки качества работы нейронных сетей на наборе данных «Развлечения»

	Accuracy	Precision	recall	F1
RNN	0.69853	0.68234	0.60123	0.63856
LSTM	0.77384	0.82056	0.75432	0.78574
GRU	0.91726	0.79234	0.80012	0.79619
BLSTM	0.92953	0.84812	0.87245	0.86018

Таблица 3

Оценки качества работы нейронных сетей на наборе данных «Религия»

	Accuracy	Precision	recall	F1
RNN	0.70347	0.72100	0.66345	0.69073
LSTM	0.84225	0.76923	0.81234	0.79032
GRU	0.85038	0.77123	0.78512	0.77811
BLSTM	0.90704	0.78456	0.84789	0.81583

Таблица 4

Оценки качества работы нейронных сетей на наборе данных «История»

	Accuracy	Precision	recall	F1
RNN	0.75901	0.69112	0.63456	0.66117
LSTM	0.84724	0.83756	0.78901	0.81207
GRU	0.90540	0.78567	0.76923	0.77738
BLSTM	0.93823	0.88029	0.83654	0.85702

Таблица 5

Оценки качества работы нейронных сетей на наборе данных «Спорт»

	Accuracy	Precision	recall	F1
RNN	0.73563	0.65432	0.61867	0.63616
LSTM	0.74932	0.79234	0.82045	0.80632
GRU	0.86944	0.76234	0.78567	0.77385
BLSTM	0.96031	0.89567	0.85678	0.87571

Усредненные оценки качества работы нейронных сетей на 5 наборах данных различной тематической направленности показали, что BLSTM превосходит другие архитектуры по ряду метрик, включая точность (Accuracy и Precision), полноту (Recall) и F-меру (рис. 2).

Анализ результатов экспериментов показал, что модель BLSTM превосходит RNN и GRU в более сложных задачах понимания контекста, что обусловлено ее способностью учитывать контекст в обе стороны (вперед и назад) благодаря двунаправленной работе. Это особенно заметно на задачах, где правильный ответ зависит от информации, содержащейся в конце

предложения. Доказано, что многие естественные языки обладают структурой, в которой ключевая информация может находиться на различных позициях текста, и именно здесь BLSTM демонстрирует свое преимущество над LSTM и RNN.

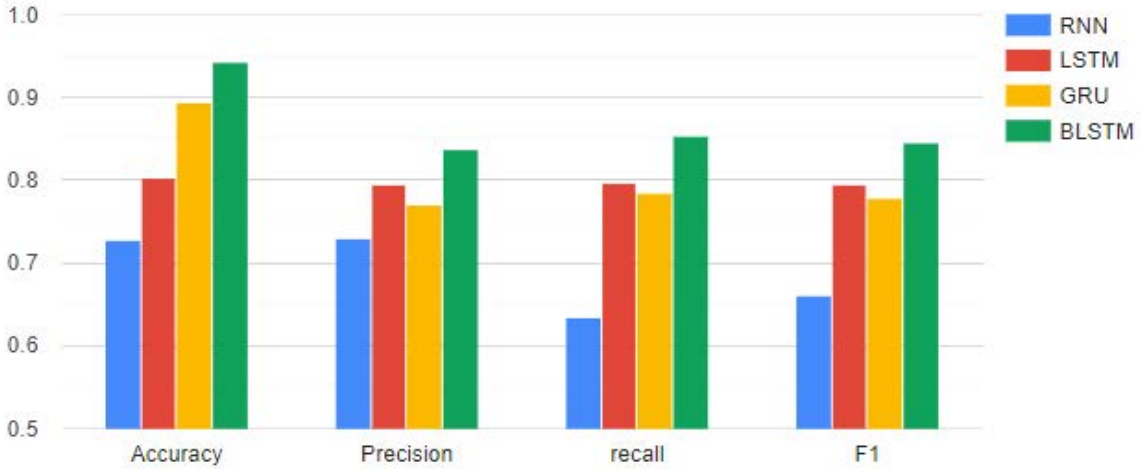


Рис. 2. Диаграмма усредненных оценок качества работы нейронных сетей на 5 наборах данных различной тематической направленности

Также можно утверждать, что модели, основанные на BLSTM показывают хорошие результаты по скорости обработки данных, в сравнении с традиционными RNN, LSTM и GRU (Рис 3).

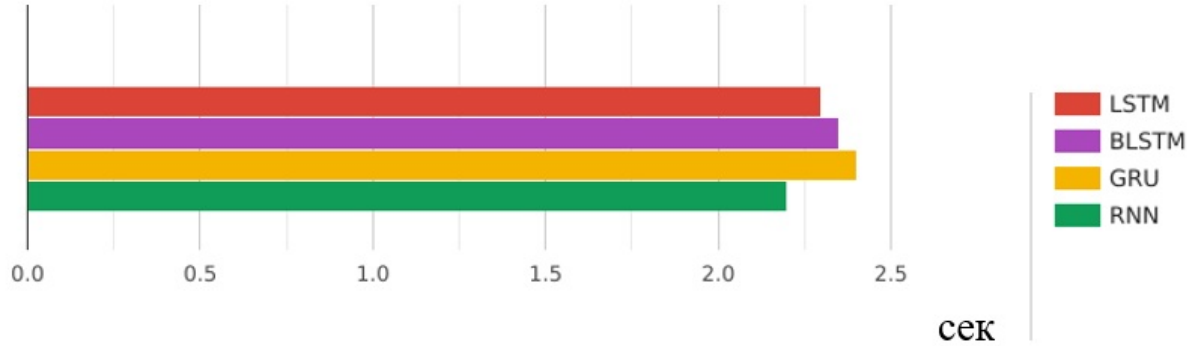


Рис. 3. График сравнения скорости обработки данных моделей

Дополнительно, архитектура BLSTM позволяет обеспечить более глубокое понимание контекста, так как пропуски в информации, относящейся к предыдущим словам или фразам, могут быть учтены за счет ее двунаправленной структуры. Таким образом, BLSTM продемонстрировала не только более высокую точность, но и способность к более глубокому учету контекста информации.

После получения положительных результатов первичных экспериментов было проведено дополнительное тестирование для оценивания результативности модели BLSTM в реальных условиях применения (рис 4).

Под результативностью понимается количество правильных ответов относительно всех ответов. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что BLSTM обладает лучшими показателями результативности, в среднем от 10 до 25 % в сравнении с другими моделями.

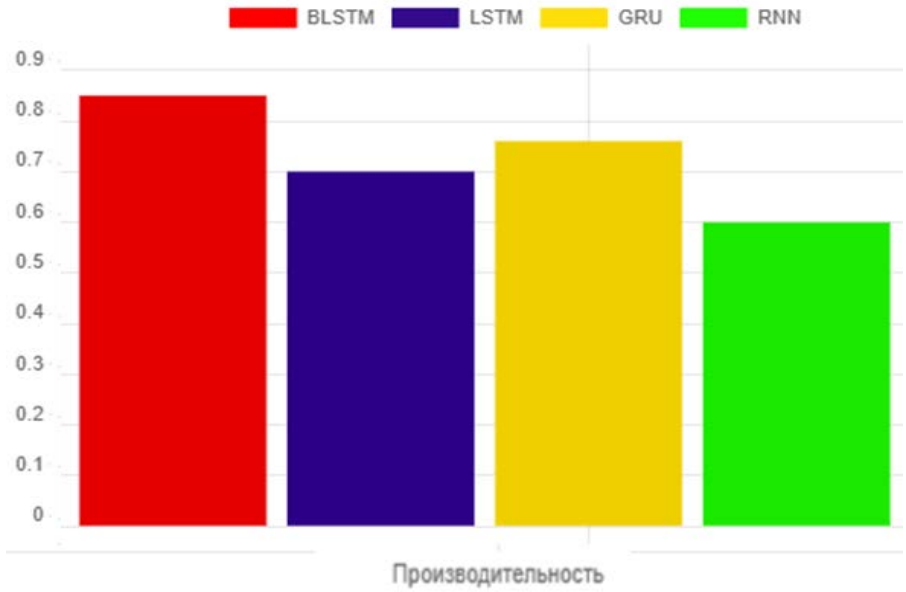


Рис. 4. Диаграмма с результатами правильности ответа на новых данных

Обобщенные результаты экспериментов подтверждают, что модель BLSTM превосходит предыдущие поколения нейронных сетей по стабильности и эффективности, что делает ее более подходящей для решения задач, связанных с анализом и генерацией текстов на естественном языке. В рамках проведенных экспериментов был проведен анализ того, как модель справляется с новыми и непредвиденными вопросами, не включенными в обучающий набор данных. Результаты показали, что модель продемонстрировала устойчивость к такому роду данных, хотя и наблюдалось небольшое снижение точности предсказаний. Это снижение было ожидаемо и объяснимо, оно также указывает на возможность дальнейших улучшений модели путем увеличения разнообразия и объема обучающих данных. Помимо этого, были исследованы возможности интеграции модели BLSTM в различные системы, такие как чат-боты и сервера автоматического ответа. Результаты подтвердили, что модель BLSTM может быть эффективно внедрена в такие системы, предоставляя пользователям быстрые и релевантные ответы на их вопросы.

Выводы. В ходе исследования были проанализированы различные аспекты и преимущества использования BLSTM по сравнению с традиционными архитектурами нейронных сетей для решения задач по созданию интеллектуальных вопросно-ответных систем. Основное внимание уделялось тому, как BLSTM справляется с задачами обработки естественного языка при наличии длинных последовательностей и учитывая контекст. В результате выявлено, что модель BLSTM демонстрирует высокую точность

и достоверность в ответах на вопросы по сравнению с более простыми архитектурами, такими как однонаправленные LSTM и традиционные рекуррентные нейронные сети. Проведенные исследование не только подтверждает теоретические преимущества BLSTM, но и показывают это на практике в ходе экспериментального оценивания при обработки различных наборов данных.

Также анализ результатов экспериментов показал, что QAS на основе BLSTM превосходит традиционные архитектуры по нескольким важным параметрам. Во-первых, точность ответов существенно повысилась благодаря двунаправленному подходу, который позволяет модели обрабатывать информацию в обоих направлениях (вперед и назад). Это особенно важно для сложных и многозначных вопросов, где последовательность слов играет критическую роль. Во-вторых, модель продемонстрировала устойчивость к «шумам» и незначительным изменениям во входных данных, что также является важным фактором. В-третьих, скорость обработки оставалась на приемлемом уровне, что делает систему пригодной для использования в интерактивных приложениях. В-четвертых, BLSTM показала высокую производительность, как в экспериментальных условиях, так и реальных. В совокупности, эти результаты подчеркивают преимущества BLSTM для решения задач обработки естественного языка и создания интеллектуальных систем.

Проведенные исследования открывают множество возможностей для дальнейшего развития и усовершенствования вопросно-ответных систем на основе BLSTM. Одним из перспективных направлений является интеграция модели BLSTM с другими архитектурами нейронных сетей, такими как трансформеры, что может привести к еще большему улучшению точности и скорости обработки. Также перспективным является исследование адаптации модели для многоязычных систем, что требует учета специфики различных языков и культурных контекстов. Важно продолжать экспериментальные исследования на более широком наборе данных и в различных предметных областях, чтобы подтвердить универсальность и применимость предложенных подходов. Все указанное, даст возможность предположить, что настоящее исследование может лечь в основу для дальнейшего развития интеллектуальных систем, способных понимать и обрабатывать человеческую речь на новом уровне и применяться при создании интеллектуальных интерфейсов для взаимодействия операторов, экспертов и лиц, принимающих решения с интеллектуальными системами поддержки и принятия решения [16-18].

Список литературы

1. Мурзин А. В. Обработка естественного языка: основы и применения. М.: Инфра-М, 2020. 250 с.

2. Романов Д. Ю. Современные тенденции в разработке вопросно-ответных систем // Информационные технологии. 2021. № 4. С. 45–57.

3. Балабанов В.И. Современные подходы к оценке производительности систем с использованием рекуррентных нейронных сетей // Компьютерные системы и сетевые технологии. 2020. М.: Изд-во БИОТ. С. 23–30.

4. Зайцев С.П. История и развитие вопросно-ответных систем: от индексированного поиска к глубокому обучению. М.: Издательство "Информатика", 2017.

5. Сидоров И.А. Проблемы и недостатки традиционных подходов к системам вопросно-ответного поиска // Информационные технологии и системы. 2021. Т. 2. № 1. С. 12–20.

6. Халисова Н.Г. Рекуррентные нейронные сети для обработки последовательных данных // Моделирование и анализ систем. 2021. Т. 3. № 2. С. 14–22.

7. Васильева М.А. Использование трансформеров в системах вопрос-ответ (QAS) // Информационные технологии. 2021. Т. 8. № 3. С. 42–50.

8. Иванов С. Е. Проблемы применения рекуррентных нейронных сетей в задачах глубокого анализа контекста // Искусственный интеллект и его приложения. 2020. Т. 9. № 4. С. 15–22.

9. Токийская исследовательская группа. Исследование применения двухнаправленных LSTM для анализа текста в юридических документах // Инновации в машинном обучении. 2017. Т. 5. № 2. С. 45–53.

10. Ковалев Д.Н. Сравнительный анализ эффективности сверточных и рекуррентных нейронных сетей в задачах обработки текстов // Современные подходы к анализу данных: Материалы конференции. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ, 2020. С. 78–85.

11. Хорьков С.В., Петров А.Б. Современные подходы к обучению рекуррентных нейронных сетей // Вестник науки и образования. 2020. Т. 67. № 1. С. 45–50.

12. Петрова Л.А., Смирнов И.В. Подготовка данных для обучения систем вопросов и ответов // Научный вестник. 2021. Т. 12. № 3. С. 58–62.

13. Шарова Е.В., Тимофеев А.С. Методы очистки и аннотации данных для моделей вопросно-ответных систем // Инженерия знаний. 2021. Т. 5. № 2. С. 33–39.

14. Павлов С.В., Сидорова Т.А. Методы разбиения данных на тренировочные и тестовые выборки в задачах машинного обучения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 4. С. 34–41.

15. Смирнов И.Г. Оптимизация параметров рекуррентных нейронных сетей для задач обработки текстов // Современные технологии в вычислительных науках. 2021. Т. 10. № 3. С. 45–52.

16. Бирюков Д.Н., Ломако А.Г. Подход к построению систем информационной безопасности, способных синтезировать сценарии упреждающего поведения в информационном конфликте // Защита информации. Инсайд. – 2014. – №6. – С. 42–50.

17. Бирюков Д.Н., Ростовцев Ю.Г., Ломако А.Г. Облик антиципирующих систем предотвращения рисков реализации киберугроз // Труды СПИИРАН. 2015. №2 (39). С. 5–25.

18. Бирюков Д.Н., Петренко С.А., Ломако А.Г. Интеллектуальные системы предотвращения кибератак // The 2019 Symposium on Cybersecurity of the Digital Economy - CDE'19. Третья международная научно-техническая конференция. 2019. С. 184-195.

Тельбух Вячеслав Владимирович, преподаватель, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Глыбовский Павел Анатольевич, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Гудков Александр Сергеевич, научный сотрудник, Россия, Санкт-Петербург, Институт проблем управления РАН, лаборатория № 57 «Активных систем»,

Ратушняк Иван Александрович, студент, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

AN APPROACH TO DESIGNING AN INTELLIGENT QUESTION-AND-ANSWER SYSTEM BASED ON THE USE OF NEURAL NETWORKS

V.V. Telbukh, P.A. Glybovsky, A.S. Gudkov; I.A. Ratushnyak

The work is devoted to the creation of an intelligent question-and-answer system based on the use of neural networks. An analysis of the scientific and practical groundwork in this area allowed us to hypothesize that the use of the BLSTM architecture can significantly increase the accuracy and relevance of the responses of the question-and-answer system compared with other neural network architectures in conditions of limited computer resource capabilities. The experimental results showed that due to its bidirectional architecture and the possibility of hyperparameter optimization, BLSTM demonstrates better performance, accuracy and reliability of prediction in comparison with such models as RNN, LSTM, GRU.

Key words: question-and-answer systems, neural networks, machine learning models, artificial intelligence.

Telbukh Vyacheslav Vladimirovich, lecturer, vka@mil.ru, Russia, Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Glybovsky Pavel Anatolyevich, docent, Russia, Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Gudkov Alexander Sergeevich, Researcher, Saint Petersburg, Russia, Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Laboratory No. 57 "Active Systems",

Ratushnyak Ivan Aleksandrovich, student, Russia, Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 654.022
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-418-419

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СРЕДЫ С ПОТЕРЯМИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДЗЕМНЫХ АНТЕНН

М.М. Бычковский

В статье представлены характеристики различных видов земной поверхности. Приведена зависимость диэлектрической проницаемости от влажности и мерзлоты почвы. Приведена формула расчета комплексной диэлектрической проницаемости среды с учетом потерь за счет проводимости среды.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, удельная проводимость.

Свойства излучателей, находящихся в среде с потерями в наибольшей степени, зависят от ее параметров. Параметры почвы, в которую помещаются подземные антенны (ε – относительная диэлектрическая проницаемость, σ – удельная проводимость Сим/м), сильно отличаются в зависимости от свойств местности, влажности почвы, времени года. В литературе [1] приводится большое количество материалов, касающихся этих параметров и отличающихся большим разнообразием, а подчас и противоречивостью.

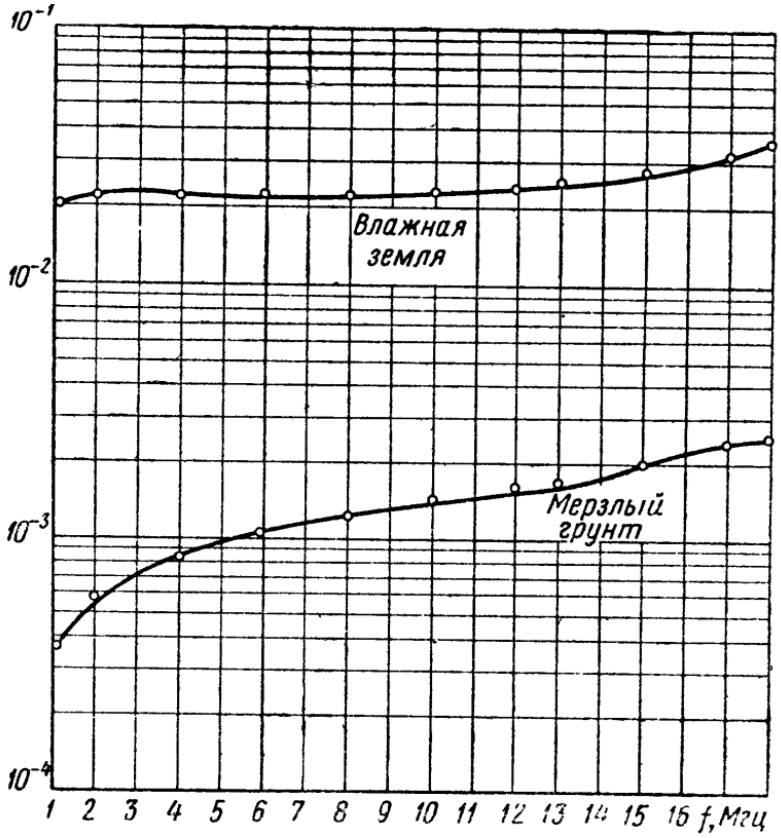
Указанное разнообразие объясняется в основном сложностью и неоднородностью структуры поверхностного слоя почвы. Однако немаловажную роль играют и методы измерения проводимости почвы и ее диэлектрической постоянной. Кроме того, с точки зрения влияния на характеристики антенных устройств, параметры почвы оказываются зависящими от частоты и имеющими определенный сезонный ход.

Наибольшей проводимостью обладает обычно самый верхний слой почвы, а ниже лежат менее проводящие слои. Следовательно, на высоких частотах, когда глубина проникновения радиоволн вглубь земли невелика, основную роль играет верхний слой. С понижением частоты в процесс формирования электрических характеристик антенн вовлекаются нижние слои с меньшей проводимостью. Если рассматривать землю как однородную среду с некоторыми эквивалентными параметрами, то эквивалентное значение проводимости будет, как правило, убывать с уменьшением частоты. Характеристики различных видов земной поверхности для постоянного тока представлены в таблице.

Характеристики различных видов земной поверхности

Характеристика земли	Диэлектрическая проницаемость, ε	Проводимость С/м, σ
Сельская местность, слегка холмистая, жирный чернозем	20	0.03
Болотистая равнина, густо поросшая лесом	13	0.0075
Каменистая почва, крутые холмы	14	0.002
Песчаная почва, сухая и каменистая	10	0.002
Городские и индустриальные районы, асфальтовые поля	30	0.001

Сезонная зависимость параметров среды заложения антенны связана с изменением агрегатного состояния верхнего слоя почвы, приводящая к заметным колебаниям значений его проводимости. На рисунке показана зависимость проводимости почвы от частоты и ее состояния.



Частотная зависимость электрической проводимости для влажной и мерзлой земли

Анализ приведенных параметров показывают, что даже для одной местности проводимость грунта может изменяться больше чем на порядок, что может привести к существенному изменению параметров подземных антенн.

Для высокочастотных токов параметры ε и σ являются комплексными и зависят от частоты. Электрические параметры однородной полупроводящей среды принято определять на основе понятия о комплексной диэлектрической проницаемости среды с учетом потерь за счет проводимости среды [2]:

$$\varepsilon_r' = \varepsilon_r - i60\sigma\lambda \qquad (1)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды; σ – проводимость среды; λ – длина волны в вакууме.

Таким образом, в статье отражены диэлектрическая проницаемость и проводимость различных видов почв, которые оказывают влияние на электрические характеристики подземных антенн. При расчете подземных антенн также необходимо учитывать влажность грунта и мерзлость земли.

Список литературы

1. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. М.: Мир, 1984. 824 с.

2. Сосунов Б.В., Филиппов В.В. Основы расчета подземных антенн. Л.: ВАС, 1990. 82 с.

Бычковский Михаил Михайлович, преподаватель, bichkovskiy.mm@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF A LOSSY ENVIRONMENT ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF UNDERGROUND ANTENNAS

M.M. Bychkovsky

The article presents the characteristics of various types of the earth's surface. The dependence of the dielectric constant on soil moisture and permafrost is shown. The formula for calculating the complex dielectric constant of the medium is given, taking into account losses due to the conductivity of the medium.

Key words: dielectric constant, specific conductivity.

Bychkovsky Mikhail Mikhailovich, lecturer, bichkovskiy.mm@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications

УДК 004.4'2
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-420-421

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ НА ЯЗЫКЕ GO

О.С. Крюков, А.Г. Волошко, А.Н. Ивутин

В работе рассматривается проблема автоматического построения модели параллельной программы для её последующего анализа. В связи с невозможностью создания универсального решения, предлагается метод и алгоритмы построения такой модели в виде Расширенных сетей Петри с семантическими связями (РСПСС) для программы на языке Go. В статье рассмотрены ключевые особенности языка и алгоритмы автоматического перевода программного кода в математическую модель. Приведен пример построения РСПСС на основе программы с несколькими функциями.

Ключевые слова: Go, сеть Петри, модель, параллелизм, автоматизация.

Введение. Развитие вычислительных систем привело к повсеместному использованию многоядерных и многопроцессорных технологий, что требует разработки специализированного программного обеспечения, учитывающего возможность многопоточного исполнения. Так, многие новые

языки программирования уже сразу разрабатываются с учетом необходимости параллельного исполнения кода. При этом до сих пор остро стоит проблема отладки и верификации параллельных программ [1]. Одним из средств, способных упростить эту задачу является анализ моделей. Однако, автоматизация построения модели параллельной программы представляется достаточно сложной задачей представляется. Это связано в первую очередь с различием возможных применяемых средств синхронизации и защиты общих данных при реализации параллельных вычислений.

В качестве модели при верификации параллельного программного обеспечения могут выступать как исполнимые (сети Петри, машины абстрактных состояний, различные автоматы и т.д.), так и логико-алгебраические модели (исчисление высказываний и предикатов, лямбда исчисление, темпоральные логики и т.д.).

На логико-алгебраических моделях строится процесс дедуктивной верификации, который состоит в генерации на основе системы и ее спецификаций набора математических доказательств, истинность которых подразумевает соответствие системы ее спецификации, и выполнения этих обязательств с использованием либо помощников доказательства (интерактивных средств доказательства теорем) или автоматических средств доказательства теорем, включая, в частности, выполнимость по модулю теорий (SMT) решатели. Основной проблемой этого подхода является необходимость построения моделей вручную [2, 3].

Альтернативой ему являются проверка выполнимости и проверка эквивалентности, объединяемые общим названием Проверка модели, и различающиеся лишь в подходе к построению спецификации программы: при проверке выполнимости используются логико-алгебраические модели [4], при проверке эквивалентности – исполнимые модели [5]. Метод проверки моделей представляет собой один из широко используемых методов статических анализа параллельных программ [6]. Проверка модели — автоматизированный подход, позволяющий проверить, соответствует ли модель программы заданной спецификации (формальному описанию свойств системы). Проверка модели может выполняться путем перебора всех возможных состояний программы или путем задания булевых отношений, связывающих начальное и конечное состояния. Именно возможность применения исполнимых моделей, построение которых зачастую можно выполнять автоматически, делает данный подход наилучшим для создания автоматизированного инструмента верификации. Главной же проблемой Проверки моделей является возможность взрывного увеличения числа состояний, но и она имеет ряд возможных решений, например, описываемые в работах [7, 8] подходы к оперированию пространствами состояний.

При разработке инструмента автоматизации построения модели программы следует также обратить внимание на язык программирования, на котором она написана. Из-за уникальных особенностей синтаксиса и набора специфических операций не получится создать универсальное решение. В этой работе будет рассматриваться построение модели для программ,

написанных на языке Go, как одного из наиболее популярных современных языков программирования [9], изначально созданного с поддержкой параллелизма.

Таким образом, необходимо выявить отличия и способы и представления в рамках выбранной математической модели, а также разработать методы автоматической трансляции исходного параллельного кода в такую модель с учетом выявленных особенностей. В этой работе для представления в качестве модели программного кода параллельных программ используются расширенные сети Петри с семантическими связями (РСПСС). Как было показано ранее [10, 11], с помощью таких сетей можно представлять параллельные алгоритмы.

Описание языка Go. Прежде чем приступить к описанию метода построения модели параллельной программы на языке Go, необходимо определить её основные элементы, которые будут подвергаться анализу. В рамках данной работы ограничимся следующим списком, элементов которого достаточно, чтобы показать основной принцип построения модели параллельной программы:

- инициализация переменных;
- присвоение значений переменным;
- структура объявления функций;
- вызов функций;
- структура выражений;
- порождение параллельного участка – оператор Go.

Язык Go обладает строгой статической типизацией, но при этом возможно неявное указание типа, в таком случае переменная принимает типа инициализирующего значения. Исходя из этого, в Go возможны следующие варианты объявления переменных:

- полное объявление:

```
var a int
```

- полное блочное объявление:

```
var (
a int
b int
)
```

- частичное объявление с инициализацией:

```
var a = 10
```

- частичное блочное объявление с инициализацией:

```
var (
a = 10
b = 20
)
```

- сокращённое объявление с инициализацией:

```
a := 10
```

Для присвоения значения ранее определенным переменным в языке Go как и при инициализации применяются операторы «=» или «:=». При

этом важно, чтобы результат выражения правой части либо совпадал по типу с переменной или их типы были взаимозаменяемыми (Go поддерживает так называемую «утиную» типизацию). Возможно также множественное присвоение, например:

var a, b int
a, b = 10, 20

Функции в языке Go обладают следующим синтаксисом:

func FuncName(a int, b string) bool {…}

где *FuncName* – имя функции, *a, b* – аргументы функции типов int и string соответственно, *bool* – тип возвращаемого значения.

Возможно указание нескольких возвращаемых значений, например:

func FuncName(a, b int) (string, bool){…}.

На этом примере также видно, что не обязательно указывать тип каждого аргумента, если они задаются последовательно и имеют один тип.

Вызов функции задаётся как

var str string
var ok bool
str, ok = FuncName(1, 2)

Функции можно вызывать в сложных выражениях. Помимо них в качестве выражений в языке Go могут выступать унарные операции, бинарные операции, идентификаторы, константы.

Функции языка Go также являются основным элементом распараллеливания. Для порождения новой горутины (легковесного потока языка Go) используется оператор «go», принимающий функцию, которая будет выполняться параллельно, обработка возвращаемого значения при этом не выполняется.

go FuncName(1, 2)

Как было сказано ранее, описанных элементов достаточно для получения представления о методе построения модели параллельной программы на языке Go. Работа с более сложными элементами, вроде структур и неименованных функций, выполняется аналогичным образом.

Далее рассмотрим представление программы на языке Go в форме модели, предоставляемое встроенными средствами.

Абстрактное синтаксическое дерево. Базовым средством для работы с исходным кодом на языке Go является абстрактное синтаксическое дерево (АСД, AST). АСД представляет собой конечное помеченное дерево, вершины которого соответствуют операторам языка, а листья – операндам (идентификаторам или константам).

Основными элементами синтаксического дерева выступают функции. Декларации функции содержатся в элементе *Decls* дерева и имеют тип *ast.FuncDecl. Они состоят из описания идентификатора функции в поле *Name*, описания структуры функции в поле *Type* типа *ast.FuncType и тела функции в поле *Body* типа *ast.BlockStmt. Структура функции в АСД описывается аргументами (поле params) и возвращаемыми значениями (поле results). В поле *List* типа []ast.Stmt содержится последовательное описание

всех операторов, используемых в функции, например:

- блочное или частичное объявление переменной: *ast.DeclStmt;
- присваивание значения или сокращённое объявление переменной: *ast.AssignStmt;
- вычисление выражения: *ast.ExprStmt;
- порождение горутины: *ast.GoStmt;
- возврат значения: *ast.ReturnStmt.

Операторы в свою очередь содержат в себе выражения (ast.Expr), к результаты вычисления которых используются в операторе, например:

- обращение к переменной по идентификатору: *ast.Ident;
- унарное выражение: *ast.UnaryExpr;
- бинарное выражение: *ast.BinaryExpr;
- вызов функции: *ast.CallExpr.

Выражения в свою очередь также могут состоять из других выражений, например, бинарное выражение состоит из двух операндов, каждый из которых выражение.

Может показаться, что АСД уже предоставляет достаточный функционал по анализу исходного кода, однако такая модель не в полной мере отвечает заявленным целям, поскольку хотя операции и соблюдают порядок вызова, то есть при последовательном выполнении возможно учесть зависимости по управлению, однако при параллельном исполнении данные зависимости уже не просматриваются, а также практически полностью отсутствует информация о семантических зависимостях, существующая в АСД только в формате ссылки на место объявления идентификатора операнда. Тем не менее данное представление может быть использовано как промежуточное представление при построении необходимой модели.

Метод построения модели параллельной программы. С нашей точки зрения наилучшие возможности по анализу связей операций в программе предоставляет Расширенная сеть Петри с семантическими связями (РСПСС) [10]. РСПСС является иерархической сетью Петри, позиции A данной сети являются математическими объектами, моделирующими операторы алгоритма. Переходы в подобной сети представлены двумя видами: переходы по управлению Z^C, отражающие порядок выполнения операций и передачу управления от одной из них к другой, и переходы по семантическим связям Z^S, отражающие зависимость по данным.

Далее рассмотрим, как модель параллельной программы на языке Go может быть построена в виде РСПСС с использованием АСД. Отметим, что РСПСС является иерархической структурой, что означает, что позицией сети может являться другая РСПСС. Это свойство позволяет моделировать вызов функции как позицию-сеть.

При анализе исходного кода для каждой отдельной объявленной функции создаётся пустая РСПСС. Заполнение позиций и переходов сети выполняется в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, если оператор не был распознан, он будет добавлен в сеть как позиция без специальной обработки. Это может быть

полезно при развитии языка, что позволит использовать алгоритм и с более новыми версиями, а для его корректировки нужно будет всего лишь добавить отдельные правила для нового оператора. Кроме того, обратим внимание, что в конце обработки операторов функции выполняется специальной позиции терминатора, представляющей некоторые действия функции в конце своей работы, и необходимой для соблюдения структуры сети: если функция пустая (не имеет операторов), РСПСС все равно будет иметь хотя бы одну позицию.

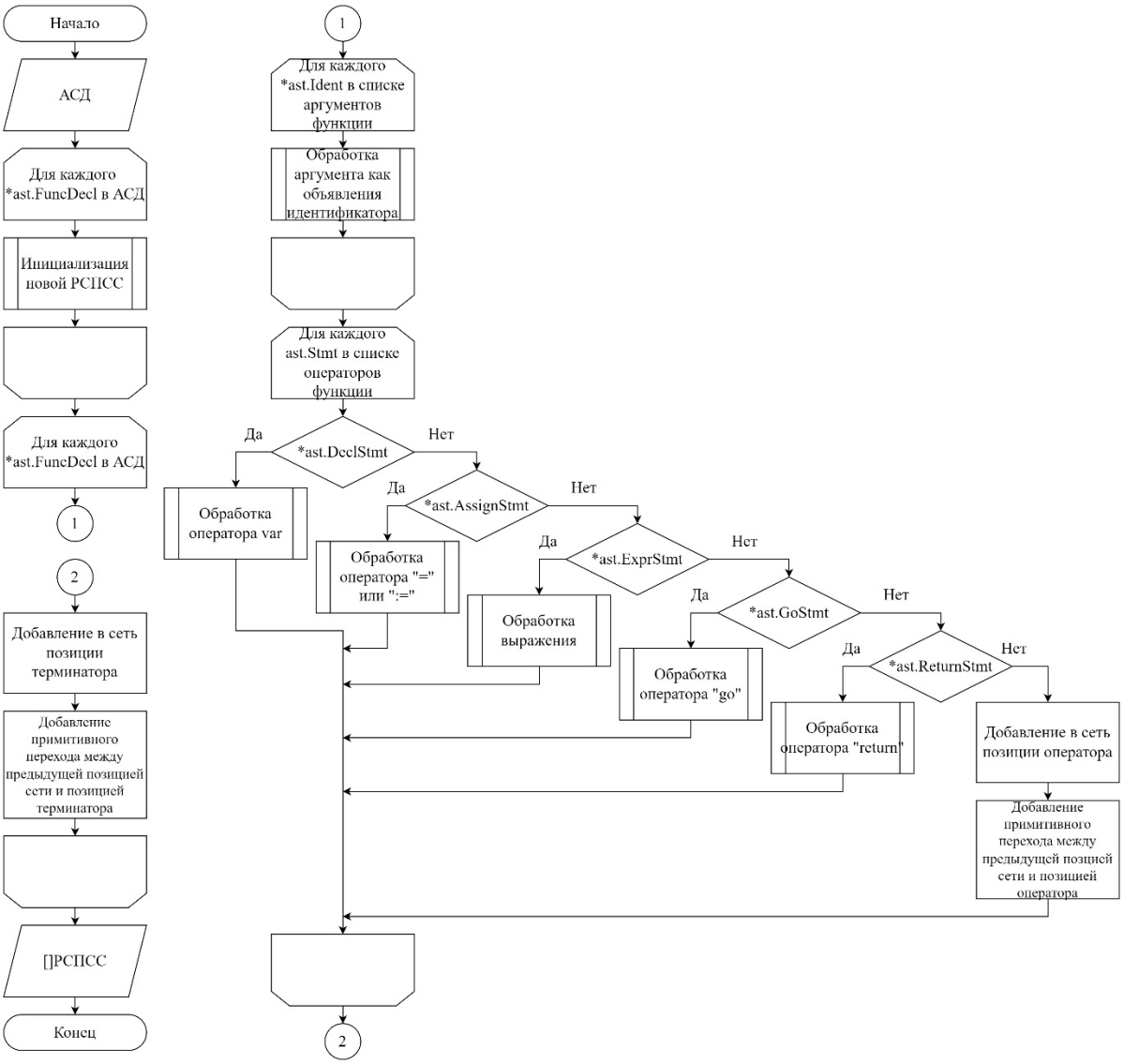


Рис. 1. Основной алгоритм построения модели программы

Рассмотрим подробнее каждый из объявленных на рисунке 1 процессов обработки операторов. На рисунке 2 представлена обработка операторов «var», «=» и «:=». Обработка этих операндов практически идентична. Единственное отличие в том, что оператор «var» означает объявление новой переменной, и, если нам не удаётся добавить новую позицию для идентификатора, значит на каком-то этапе произошла ошибка. Получение первой

добавленной позиции идентификатора необходимо для использования в семантических переходах, представляющих реальные процессы записи в ранее выделенную память, которую эта позиция отражает. Добавление двух таких переходов представлено на рисунке 2. Первый из них отражает зависимость оператора от ранее выделенной памяти, а второй – зависимость значения в этой памяти от оператора.

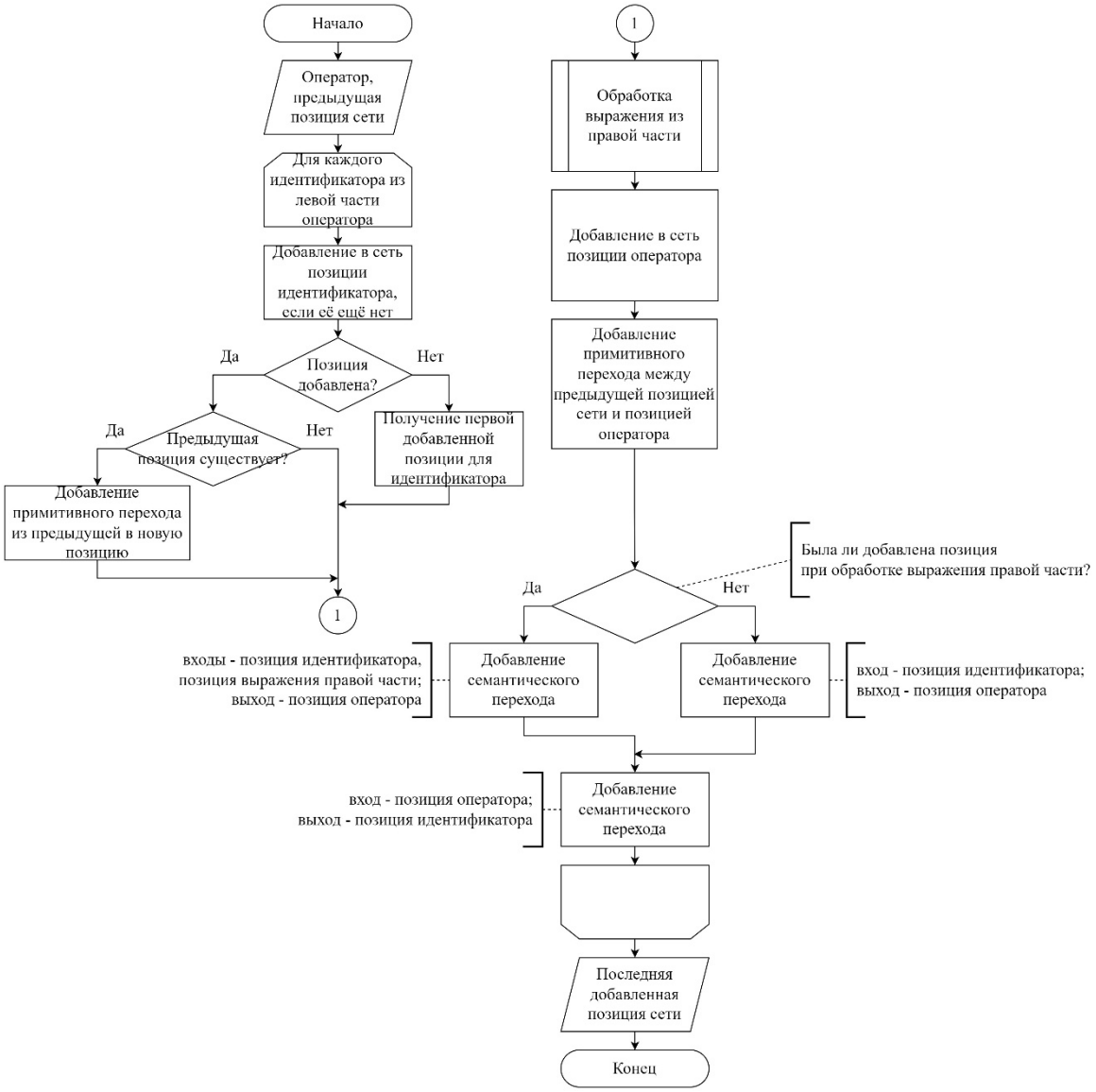


Рис. 2. Алгоритм обработки инициализации переменных и/или присвоения им значения

Далее рассмотрим обработку выражений, обработка некоторых из которых представлена на рисунке 3. Как и в случае с операторами, все выражения, не соответствующие проверке, добавляются в виде позиции сети без специальной обработки, но в последствии для них можно реализовать собственные правила. Например, константы (*ast.BasicLit) можно вовсе игнорировать при обработке, так как память, выделенная под них, неизменяема, и в следствии этого возможно опустить их анализ, а унарное выражение

(*ast.UnaryExpr) может рассматриваться аналогично бинарному, с той лишь разницей, что в нём есть только одно выражение. Также стоит уделить внимание тому, что не всегда при анализе выражения вызова функции возможно найти соответствующую ему РСПСС. Это связано с тем, что не все файлы программы участвуют в анализе (например файлы и функции стандартной библиотеки Go). В таком случая вместо позиции-сети выполняется добавление обычной позиции, отражающей идентификатор функции.

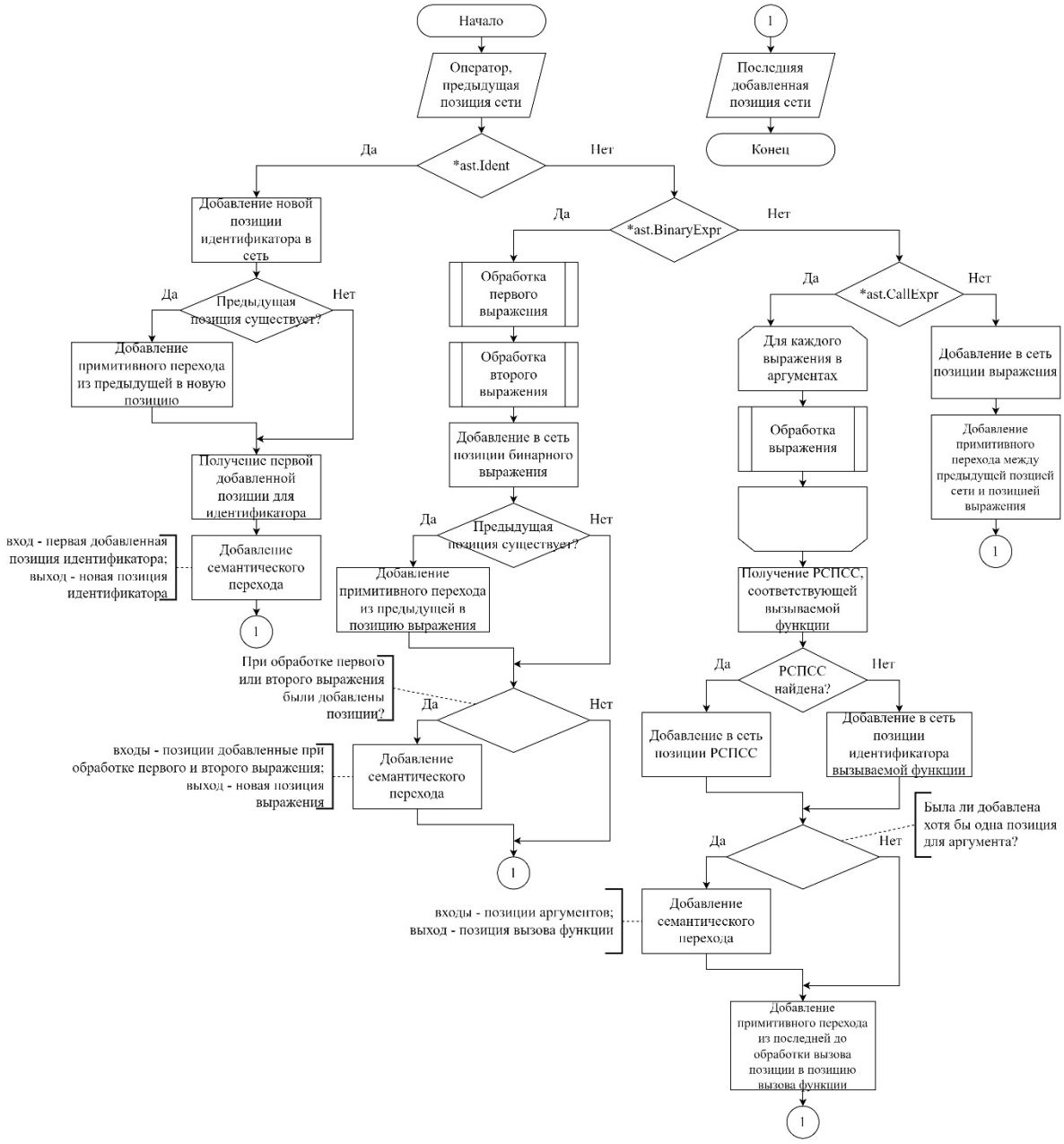


Рис. 3. Алгоритм обработки выражений

На рисунке 4 представлен алгоритм обработки оператора «return», в котором в качестве выражений выступают вычисления возвращаемых значений. Каждое из выражений обрабатывается в соответствии с алгоритмом рисунка 3.

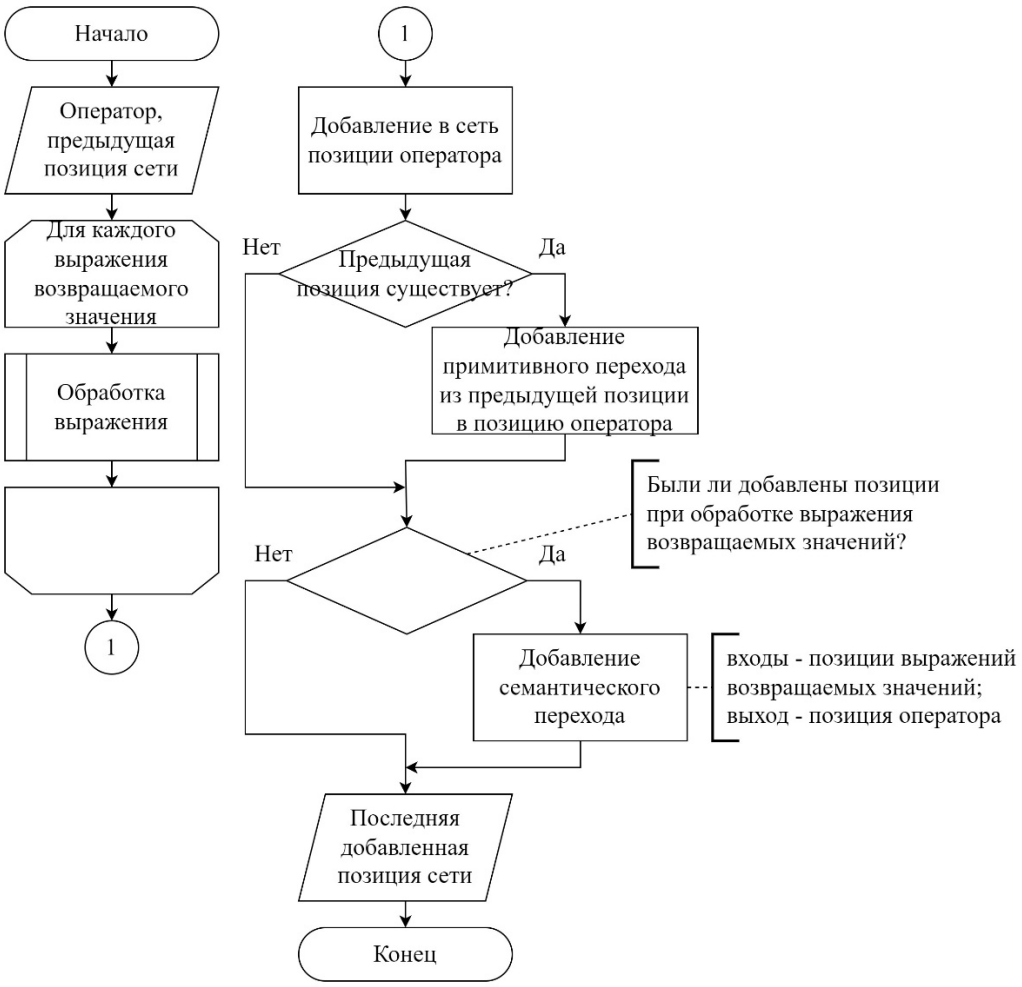


Рис. 4. Алгоритм обработки оператора «return»

На рисунке 5 представлен процесс обработки оператора «go». Как видно из него он практически полностью повторяет обработку выражения вызова функции (*ast.UnaryExpr). Основными отличиями при обработке оператор «go» являются необходимость добавления в РСПСС позиции оператора, а также добавление перед вызовом функции не примитивного перехода по управлению, а перехода типа Fork, так как данный оператор выполняет запуск параллельного исполнения функции. Вторым выходом сформированного перехода типа Fork является первая позиция, сформированная при обработке следующего за оператором «go» оператора. Если же такого оператора нет, то вместо него будет выступать позиция терминатор. Таким образом, при обработке оператора «go» в РСПСС появляются параллельные участки.

Конечно, здесь были рассмотрены не все операторы и выражения, встречающиеся в языке Go, но представленной информации должно быть достаточно для понимания основных принципов построения Расширенных сетей Петри с семантическими связями на основе абстрактного синтаксического дерева.

Далее рассмотрим применение представленных алгоритмов на примере.

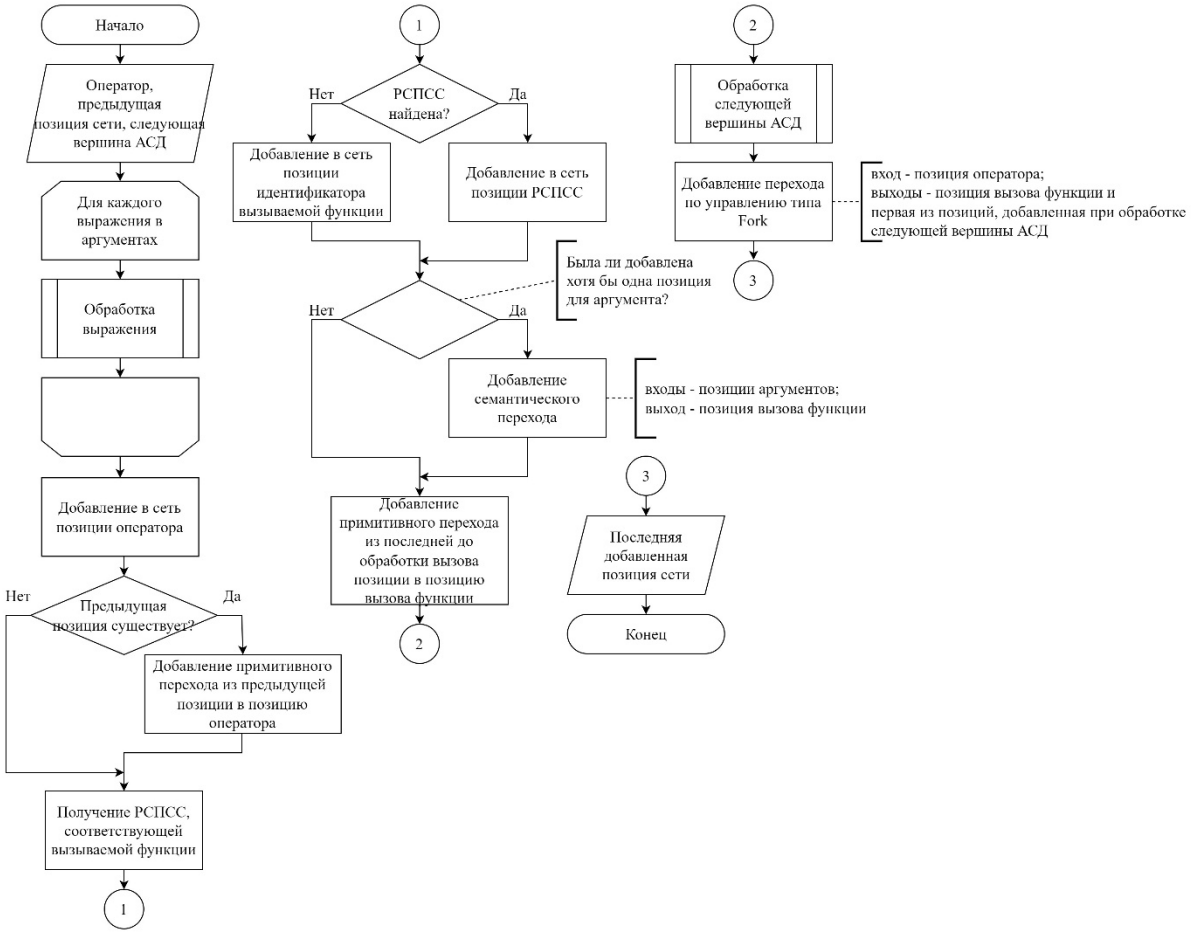


Рис. 5. Алгоритм обработки оператора «go»

Пример построения модели. Для примера работы алгоритмов построения модели воспользуемся следующей программой.

```
func Fn() {
        a := 10
        var b = GetB()
        go Sum(a, b)
}
func GetB() int {
        return 100
}
func Sum(a, b int) int {
        return a + b
}
```

Данная программа имеет три функции: *Fn* – содержит вызовы, *GetB* – возвращает константу 100, и *Sum* – возвращает сумму переданных ей значений. На рисунке 6 представлены три РСПСС, получаемые в результате применения описанных алгоритмов: позиции сети изображаются кругами, переходы по управлению – линиями, а переходы по семантическим связям – треугольниками. Рассмотрим подробнее процесс получения представленного результата.

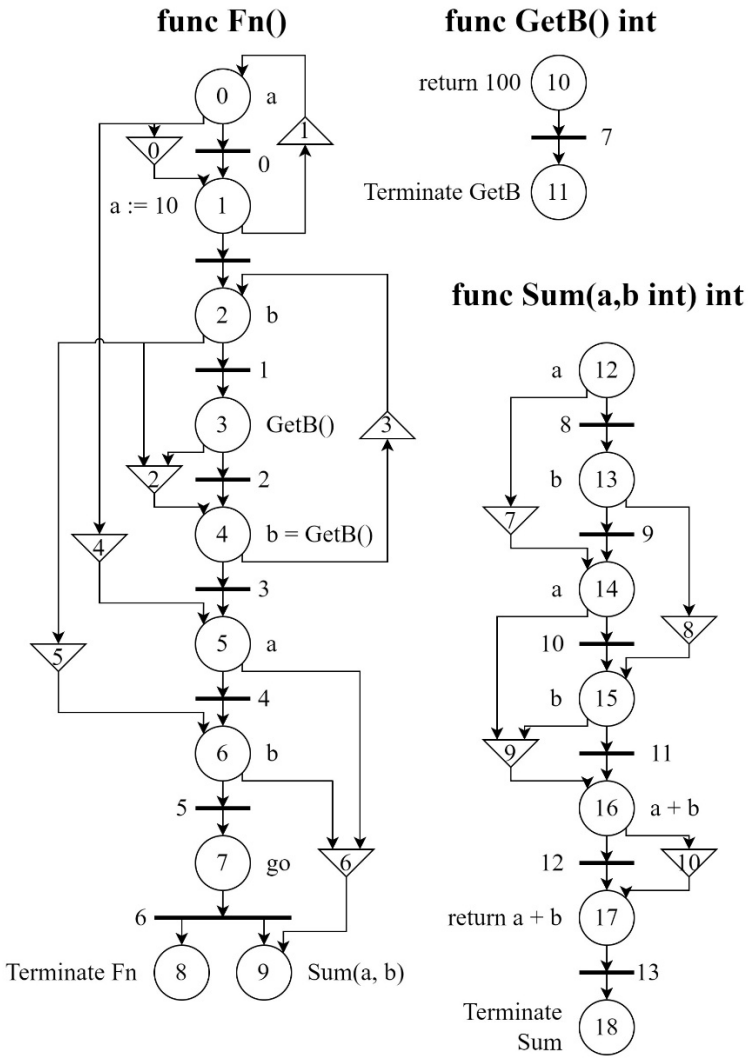


Рис. 6. РСПСС программы с тремя функциями

При обработке функции *GetB*, генерируется РСПСС, имеющая 2 позиции: позиция оператора «return» (10) и позиция терминатор (11); между ними создаётся примитивный переход по управлению (7). Результатом обработки оператора «return» является только одна позиция, так как выражением возвращаемого значения является константа, а при его обработке позиции и переходы не добавляются.

При обработке функции *Sum*, генерируется РСПСС, имеющая 7 позиций: позиции объявления идентификаторов аргументов функции (12 и 13), позиции чтения значения аргумента *a* (14) и аргумента *b* (15), позиция вычисления выражения возвращаемого значения *a*+*b* (16), позиция оператора «return» и позиция терминатор. Между позициями создаются примитивные переходы, так как функция полностью последовательная. Кроме того, создаются 4 перехода по семантическим связям: зависимость позиции чтения значений аргументов от позиции объявления их идентификаторов (7 и 8), зависимость вычисления выражения возвращаемого значения от двух подвыражений, входящих в её состав (9), и зависимость позиции оператора «return» от позиции вычисления возвращаемого значения (10).

При обработке функции *Fn*, генерируется РСПСС, имеющая 9 позиций, 7 из которых обычные: позиции объявления идентификаторов переменных *a* и *b* (0 и 2), позиции записи в них значений (1 и 4), позиции чтения значения переменных *a* и *b* (5 и 6), позиция оператор «go» (7) и позиция терминатор (8); 2 позиции являются позициями-сетями: вызов функции *GetB* (3) и вызов функции *Sum* (9). Так как в функции имеется оператор «go», вызывающий функцию *Sum*, то между его позицией, позицией вызова функции и позицией следующего за оператором «go» оператора формируется переход по управлению типа Fork (8), но так как «go» является завершающим оператором функции, вторым выходом перехода становится позиция терминатор. Формируемые семантические переходы показывают следующие зависимости: зависимость позиции записи значения от позиции объявления идентификатора (0 и 2), зависимость позиции объявления идентификатора от позиции записи значения (1 и 3), зависимость позиции записи значения от позиции вычисления выражения записываемого значения (2), зависимости позиций операции чтения значений переменных от позиций объявления идентификатора (4 и 5), зависимость позиции вычисления выражения вызова функции с аргументами от позиций чтения значений переменных, передаваемых в качестве этих аргументов (6).

Таким образом, можно утверждать, что представленные выше алгоритмы позволяют с достаточной точностью сформировать полноценную модель параллельной программы в виде Расширенных сетей Петри с семантическими связями, и предоставляющую всю необходимую для дальнейшего её анализа информацию: список выполняемых операций в виде позиций сети, последовательность выполнения операций, контролируемая переходами по управлению, и зависимость между операциями по данным, отраженная в переходах по семантическим связям. Как было сказано, в представленных алгоритмах рассматриваются не все структуры языка Go, однако с добавлением правил их обработки суть модели не изменится.

Заключение. Предложенный в статье метод построения модели параллельной программы на языке Go позволяет получить достаточно точный её вариант в виде Расширенных сетей Петри с семантическими связями. Подобная модель позволяет отобразить всю необходимую информацию о структуре программы и зависимостях, выполняемой в ней операций, что позволит при дальнейшем анализе обнаруживать такие ошибки, как гонки данных и взаимоблокировки. Кроме того, преимуществом метода является возможность его расширения алгоритмами обработки ранее нерассмотренных операторов и выражений, что позволяет поддерживать его актуальным, несмотря на усложнение языка со временем. Дальнейшая работа будет направлена на обнаружение взаимоблокировок и гонок данных на основе анализа представленной модели.

Список литературы

1. Миронов А.М. Процессный подход к моделированию и верификации параллельных программ // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2022. Т. 26. №. 1. С. 101-106.

2. Кокорин А.О., Тиевский С.Д., Девянин П.Н. Приемы дедуктивной вери фикации программного кода с использованием Astraver Toolset // ПДМ. Приложение. 2022. №15. С. 80-90.

3. Ушакова М.С. Методы и инструментальные средства формальной верификации функционально-потоковых параллельных программ: дис. канд. техн. наук. Красноярск, 2021. 219 с.

4. Barnat J. et al. Parallel model checking algorithms for linear-time temporal logic. // Handbook of Parallel Constraint Reasoning. Cham: Springer International Publishing, 2018. P. 457-507. DOI: 10.1007/978-3-319-63516-3_12.

5. Jbeli N., Sbaï Z., Ayed R. Ben. TCTL Model Checking of Time Petri Nets // Transactions on Computational Collective Intelligence XXX. Cham: Springer International Publishing, 2018. P. 242-262. DOI: 10.1007/978-3-319-99810-7_12.

6. Clarke E.M., Henzinger T.A., Veith H., Bloem R. Handbook of Model Checking. Cham: Springer International Publishing, 2018. P. 1212. DOI: 10.1007/978-3-319-10575-8.

7. Камкин А.С. Проецирование систем переходов: преодоление комбинаторного взрыва при верификации параллельных систем // Программирование. 2015. № 6. С. 53-71.

8. В.А. Тихомиров, С.Г. Тимофеев, Е.А. Мошкова. Модифицированный метод верификации программ на модели // Вестник Российской академии естественных наук. 2018. С. 118-121.

9. The RedMonk Programming Language Rankings: January 2024 // Stephen O'Grady; RedMonk. Portland, 2024. [Электронный ресурс] URL: https://redmonk.com/sogrady/2024/03/08/language-rankings-1-24 (дата обращения: 13.12.2024).

10. Kryukov O., Voloshko A. Structural Analysis of the Process Based on Extended Petri Nets with Semantic Relations // Advances in Automation III. RusAutoCon 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022. Vol 857. P. 224-236. DOI: 10.1007/978-3-030-94202-1_22

11. Крюков О.С., Волошко А.Г., Ивутин А.Н. Автоматизация формирования максимального параллелизма в процессе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 10. С. 230-237.

Крюков Олег Сергеевич, аспирант, ol_kryukov97@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Волошко Анна Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент, atroshina@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ивутин Алексей Николаевич, д-р техн. наук, профессоор, заведующий кафедрой, alexey.ivutin@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METHOD FOR AUTOMATICALLY BUILDING A PARALLEL PROGRAM MODEL IN GO LANGUAGE

O.S. Kryukov, A.G. Voloshko, A.N. Ivutin

The paper considers the problem of automatic construction of a parallel program model for its subsequent analysis. Due to the impossibility of creating a universal solution, a method and algorithms for constructing such a model in the form of Extended Petri Nets with Semantic Relations (ExPNSR) for a program in the Go language are proposed. The article considers the key features of the language and algorithms for automatic translation of program code into a mathematical model. An example of constructing ExPNSR based on a program with several functions is given.

Key words: Go, Petri net, model, parallelism, automation.

Kryukov Oleg Sergeevich, postgraduate, ol_kryukov97@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Voloshko Anna Gennad'evna, candidate of technical sciences, docent, atroshina@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ivutin Alexey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, alexey.ivutin@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.942
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-433-434

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Р.А. Ишмуратов, Р.С. Зарипова

В статье приведены результаты вычислений и сопоставление методов спектрального анализа временных рядов различного типа. Моделирование проведено с использованием прикладного пакета MATLAB. Рассматриваются три метода: классическая периодограмма и более развитые параметрические методы – алгоритм Берга и метод MUSIC. Показано преимущество параметрических методов в случае различных моделей временного ряда. Также показано, что эти методы имеют свои ограничения и их применение требует повышенного внимания со стороны инженера-исследователя.

Ключевые слова: *цифровые технологии, спектральный анализ, цифровая обработка данных, временные ряды, сигналы, колебания, помехи, прикладные пакеты, MATLAB.*

Введение. Физические явления как природного, так и техногенного происхождения часто имеют периодический характер. К числу таких явлений можно отнести синоптические и климатические колебания метеорологических параметров, сейсмические колебания поверхности земли, виброакустические колебания производственных станков и многие другие процессы в самых различных областях науки и техники. Например, периодический характер имеют наблюдаемые малые изменения орбиты Луны [1]. Экспериментальные исследования периодических процессов заключаются в измерении и регистрации временных рядов. Дальнейший анализ сводится к выделению в спектре зарегистрированного сигнала искомой периодической

составляющей. Однако это часто затруднено по различным причинам. Для их анализа рассмотрим вначале типы временных рядов периодических процессов:

1. Низкочастотный периодический процесс, регистрируемый при короткой длине временного ряда по сравнению с периодом (в общем случае – некратное количество периодов).

2. Высокочастотный (по сравнению с длиной ряда) периодический процесс с малой амплитудой, регистрируемый на фоне различных узкополосных и широкополосных помех.

3. Нестационарный (локальный во времени) периодический процесс – цуги волн.

4. Непериодический процесс.

Задача исследователя заключается в выделении и изучении возможных периодических составляющих во временных рядах, т.е. проведении спектрального анализа исследуемого физического процесса. Для этого разработаны различные методы спектрального оценивания – начиная от простого периодограмм-анализа (вычисления Фурье-спектра) и заканчивая трудоемкими с математической точки зрения параметрическими методами анализа [2, 3]. Каждый из них имеет свои достоинства и ограничения.

Особенностью классического Фурье-спектра является простота реализации алгоритма вычислений и наглядность результатов при их интерпретации, что является несомненным достоинством в научно-исследовательской работе инженеров различного профиля. Однако, к сожалению, он дает далеко не всегда корректный результат и необходимо применение других методов. Выбор альтернативного метода, и тем более его реализация, является задачей нетривиальной и математически трудоемкой [4]. Тем не менее, современные информационные технологии достигли такого уровня, что позволяют решать задачи подобного рода специалистам без специальной математической подготовки и тем самым повысить уровень компетентности в данной области.

Целью данной работы является помощь специалистам различных областей исследования получить общее и в тоже время достаточно полное представление данной тематики, и на основе этого принимать в случае необходимости правильное решение. Для достижения этой цели перед авторами работы стояла задача выбора прикладного программного обеспечения и проведение соответствующего моделирования. В плане работ также стоят следующие задачи: изучение методов спектрального анализа сигналов, их сравнительный анализ и определение возможных ограничений для их применения.

Методы исследования. В данной работе из приведенной выше классификации типов временных рядов периодических процессов мы будем рассматривать только первые два: во-первых, это случай регистрации периодического процесса в условиях короткой длины ряда (исследование условно «низкочастотного», или «долгопериодного» процесса); во-вторых, это случай регистрации «высокочастотного» (относительно длины ряда)

периодического процесса с малой амплитудой на фоне интенсивных помех. Другие типы временных рядов имеют свою специфику и требуют соответственно отдельного подхода.

Математическая модель входного сигнала, предполагаемая классическими спектральными методами, основанными на Фурье-подходе – это сумма бесконечных во времени синусоидальных колебаний (гармоник) с некоторыми амплитудами A_k, частотами, кратными основной частоте (частоте первой гармоники), $k\omega_0$, и фазами φ_k:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos\left(k\omega_0 t - \varphi_k \right). \quad (1)$$

В реальности мы не можем регистрировать бесконечные временные ряды. Специфика регистрации периодических процессов по коротким записям данных заключается в том, что в этом случае всегда выбирается только малый фрагмент гармонического колебания, при этом часто интервал регистрации не совпадает с завершенным полным периодом гармоники (рис. 1).

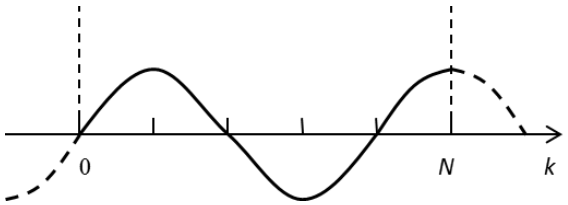


Рис. 1. Пример регистрации периодического процесса по коротким записям данных

В случае, когда на интервале N укладывается некратное число периодов, это автоматически приводит к ошибке в модели представления входного сигнала. На спектре это проявляется так называемым эффектом «растекания спектра» [2].

Для решения данной проблемы необходимо применение новых методов спектрального анализа, основанных на других, в отличие от Фурье-подхода, идеях [4]. Суть новых подходов (например, алгоритм Берга и др.) заключается в представлении временного ряда не в виде суммы гармонических колебаний, а как реализация некоторого случайного процесса. Такой подход автоматически предполагает, что за пределами интервала регистрации N сигнал не обязательно должен повторяться.

Результаты исследования. На этапе моделирования стоит задача выбора программного обеспечения. Выполнить процедуру спектрального анализа можно с использованием различных программных средств [5, 6]. Например, напрямую реализовать алгоритм спектрального оценивания с применением систем программирования (например, Visual Basic или Visual C#). Можно использовать среды компьютерной математики (MathCAD, MATLAB), специализированное инженерное программное обеспечение (LabVIEW) [7]. Для наших целей наиболее оптимальным выбором является прикладной пакет MATLAB, который обладает такими достоинствами, как удобство программирования, наглядность визуализации данных (легкость

построения графиков) и, самое главное, наличие большого количества встроенных функций, в том числе реализующих сложные алгоритмы получения спектральных оценок.

С применением специализированных функций MATLAB было проведено моделирование различных временных рядов и их спектральный анализ.

Вначале рассмотрим результаты моделирования спектрального оценивания по коротким записям данных (рис. 2).

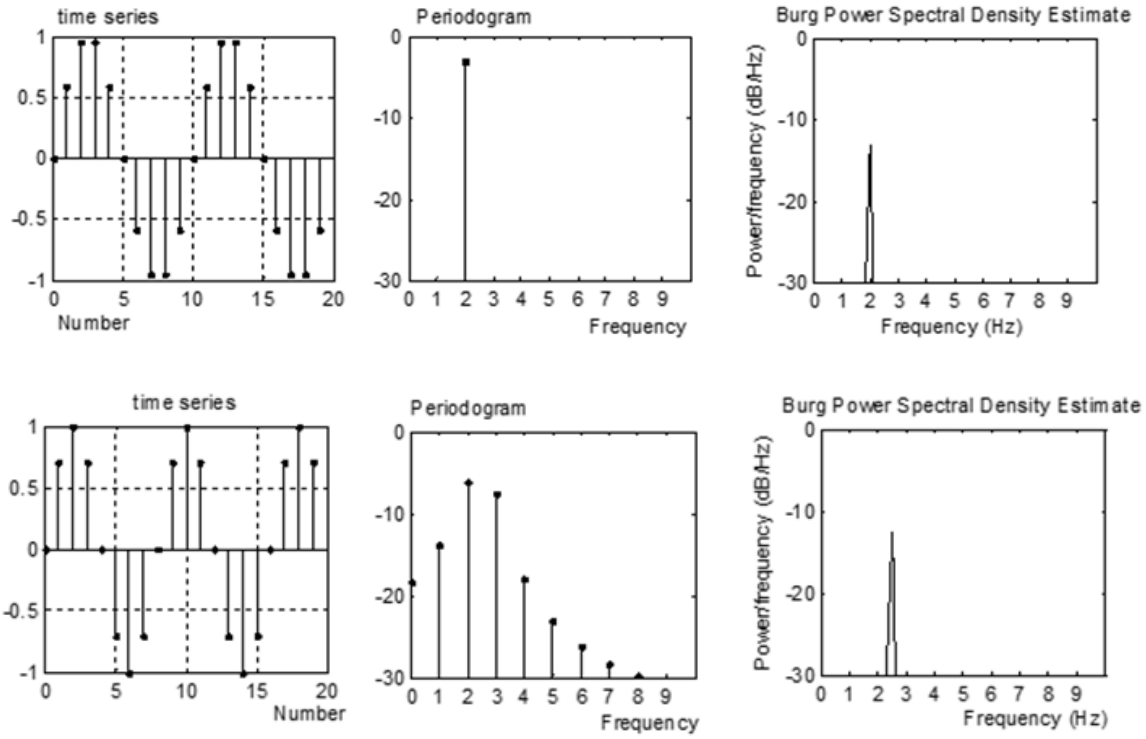


Рис. 2. Результаты моделирования спектрального оценивания по коротким записям данных

На рис. 2 приведены: временной ряд (time series), Фурье-спектр (Periodogram), спектр по алгоритму Берга (Burg Power Spectral Density Esti-

Длина ряда была выбрана равной 20 отсчетам. Модель периодического процесса – одно синусоидальное колебание с периодом T_0. Были рассмотрены два случая:

1) на интервале $N = 20$ укладывается ровно два периода: $T_0 = 10$.

2) период не кратен длине ряда: $T_0 = 8$ (два полных периода и еще четверть периода).

Вычислялись спектральные оценки двумя способами: периодограмма (Фурье-спектр в соответствие с формулой (1)) и спектр по алгоритму Берга [4].

Проведенное моделирование показывает следующее. В случае длины ряда, регистрирующей полные (завершенные) периоды исследуемого колебания, обе спектральные оценки дают верный результат (рис. 2,

три верхних графика). Однако ситуация кардинально меняется, когда длина временного ряда не кратна периоду (рис. 2, три нижних графика). В этом случае периодограмма дает ложные оценки (спектр «растекается» по соседним гармоникам), а спектр Берга, по-прежнему, правильно оценивает периодический процесс.

Перейдем к другой модели временного ряда. Была рассмотрена сумма нескольких, а именно трех, синусоидальных сигналов с различными амплитудами A_k и частотами f_k, причем амплитуда 3-го сигнала намного меньше амплитуд первых двух:

1-й сигнал: $A_1 = 2$, $f_1 = 50$ Гц;

2-й сигнал: $A_2 = 5$, $f_2 = 120$ Гц;

3-й сигнал: $A_3 = 0{,}1$ и $f_3 = 300$ Гц.

Кроме этого, на данный сигнал была наложена широкополосная помеха («белый шум») с интенсивностью σ, сравнимой с амплитудами синусоид.

Длина интервала составляет $N = 200$ отсчетов. Проведено спектральное оценивание тремя способами, алгоритмы вычисления которых реализованы встроенными функциями пакета MATLAB:

1) периодограмма;

2) метод MUSIC (Multiple Signal Classification);

3) алгоритм Берга.

Результаты моделирования приведены на рис. 3.

Как видно, все методы, включая периодограмму, хорошо выделяют два синусоидальных колебания (спектральные пики на частотах 50 и 120 Гц). Однако колебание с малой амплитудой (300 Гц) на периодограмме «тонет» на фоне шумов. Зато оно уверенно выделяется на спектре, полученном методом MUSIC (с небольшим завышением частоты). Алгоритм Берга также дает не лучшие оценки.

Вывод: из трех рассмотренных методов наилучшие результаты дает метод MUSIC. Таким образом, метод MUSIC следует применять в тех случаях, когда исследуется один или несколько периодических процессов малой амплитуды на фоне широкополосного шума.

Однако применение метода MUSIC так же, как и других аналогичных параметрических методов спектрального оценивания, требует осторожности и повышенного внимания. Высокая разрешающая способность данных методов подчас оборачивается чрезмерной чувствительностью к задаваемым параметрам модели входного сигнала, которые определяют ход алгоритма и количество производимых вычислений [2]. Некорректно заданные параметры (называемые порядком модели) могут привести к существенным искажениям спектральных оценок с последующей неверной интерпретацией результатов измерений.

Для иллюстрации сказанного приведем результаты моделирования следующего временного ряда: один синусоидальный сигнал с амплитудой $A = 1$ и частотой $f = 100$ Гц. Методы спектрального оценивания выбраны теми же.

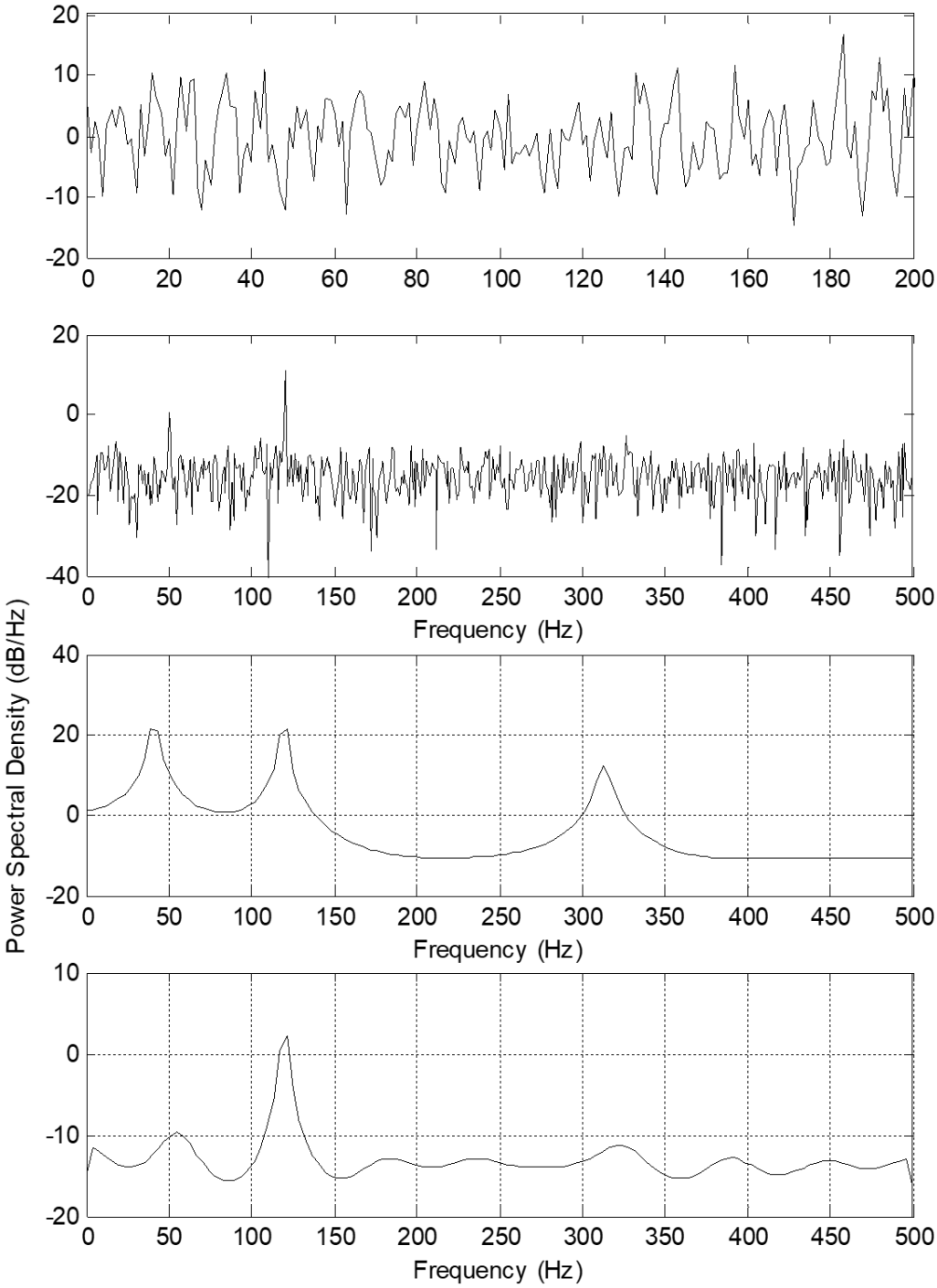


Рис. 3. Результаты моделирования спектрального оценивания сигнала из суммы трех синусоид на фоне интенсивного белого шума ($\sigma = 5$)

В идеальном случае – сигнал без шума – все методы работают корректно. После добавления шума спектральные оценки существенно меняются (рис. 4). На периодограмме можно выделить слабый пик на частоте 100 Гц. На спектрах MUSIC и Берга кроме того наблюдается отдельный максимум на частоте 300 Гц. Этот ложный спектральный пик обусловлен неправильно выбранным, а именно завышенным порядком модели [8].

Выбран порядок моделей 4 и 5.

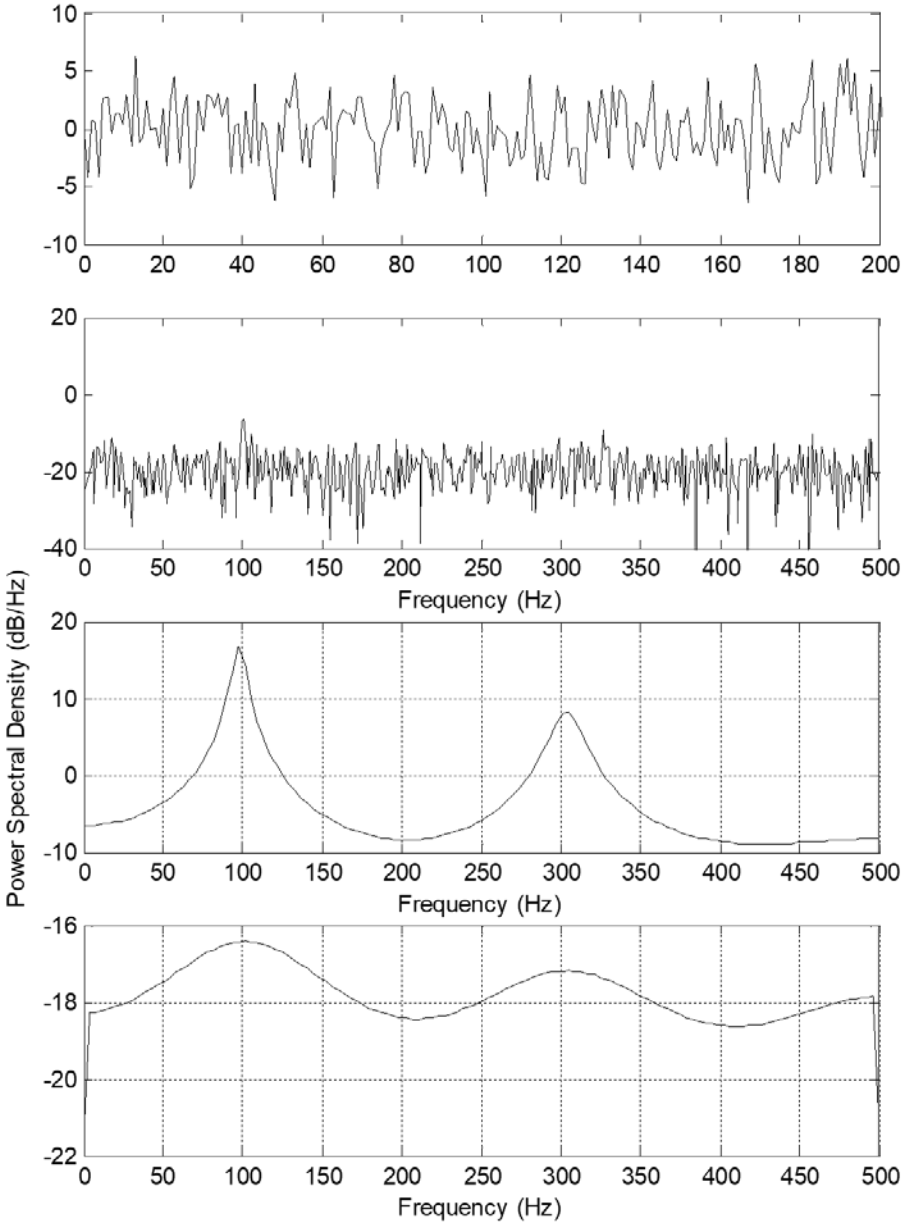


Рис. 4. Результаты моделирования с добавлением шума

Заключение. В результате применения современных технологий – моделирования в среде MATLAB – были сопоставлены и проанализированы результаты вычисления спектральных оценок, полученных различными методами [9, 10].

Моделирование показало, что классический Фурье-анализ (периодограмма) при исследовании периодических процессов по коротким записям данных приводит к искажению результата – так называемому «эффекту растекания спектра», поэтому необходимо применение альтернативных параметрических методов спектрального анализа.

Основные параметрические методы – алгоритм Берга и метод MUSIC – реализованы в виде встроенных функций среды компьютерной математики MATLAB. При исследовании низкочастотных периодических

процессов по коротким записям данных хороший результат показывает алгоритм Берга.

При исследовании одного или нескольких периодических процессов на фоне интенсивных узкополосных и широкополосных помех наиболее точным и обладающего высоким частотным разрешением является метод MUSIC.

Применение параметрических методов спектрального анализа требует со стороны исследователя осторожности и повышенного внимания. Высокая разрешающая способность данных методов требует корректного задания значений параметров моделей исследуемого входного сигнала. Некорректно заданные параметры могут привести к существенным искажениям спектральных оценок и, следовательно, к неверным интерпретациям данных измерений.

Полученные результаты могут быть полезны в научной деятельности, а также в учебной подготовке инженеров различных специальностей в тех областях, где перед исследователем возникает необходимость анализа временных рядов.

Список литературы

1. Petrova N., Abdulmyanov T., Hanada H. Some qualitative manifistations of the physical libration of the Moon by observing stars from the lunar surface // Adv. Space Res., 2012, Vol.50, P. 1702-1711.

2. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов (3-е изд.). С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2013. 768 с.

3. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов (3-е изд.). М.: Техносфера, 2019. 1048 с.

4. Кей С.М., Марпл С.Л. Современные методы спектрального анализа: обзор / С.М. Кей, С.Л. Марпл // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектроники. 1981. Т.69. №11. С. 5-51.

5. Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М., Мухаммадиев А.А. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях через металлоконструкцию здания на основе физического моделирования // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 10.

6. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г., Назметдинов Ф.Р. Снижение электромагнитных помех и защита информации в вычислительной технике с помощью экранирующих стекол // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017. № 3 (35). С. 46-57.

7. Залялова Г.Р. Моделирование цифрового фильтра с применением инструментов среды MATLAB / Г.Р. Залялова, Р.С. Зарипова // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук: материалы III научно-практической всероссийской конференции молодых ученых. 2017. С.190-194.

8. Ситников С.Ю., Ситников Ю.К. Использование компьютерных моделей при работе в учебной лаборатории // Ученые записки ИСГЗ. 2014. Т. 12. № 1-1. С. 353-357.

9. Мухаметзянов И.И., Зарипова Р.С Цифровое моделирование как способ повышения качества образования в техническом вузе // Казанская наука. 2024. № 3. С. 129-131.

10. Ишмуратов Р.А., Зарипова Р.С. Роль и место программных приложений в образовательном процессе // Преподавание информационных технологий в Российской Федерации: материалы семнадцатой открытой Всероссийской конференции. Новосибирск, 2019. С. 156-158.

Ишмуратов Рашид Аминович, канд. физ.-мат. наук, доцент, rash-i@mail.ru, Россия, Казань, Казанский государственный энергетический университет,

Зарипова Римма Солтановна, канд. техн. наук, доцент, zarim@rambler.ru, Россия, Казань, Казанский государственный энергетический университет

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF DIFFERENT METHODS SPECTRAL ANALYSIS OF TIME SERIES WITH DIGITAL TECHNOLOGY

R.A. Ishmuratov, R.S. Zaripova

The paper presents the results of calculations and comparison of methods of spectral analysis of time series of different types. Modelling is carried out using the MATLAB application package. Three methods are considered: classical periodogram and more developed parametric methods - Berg's algorithm and MUSIC method. The advantage of parametric methods in the case of different models of time series is shown. It is also shown that these methods have their limitations and their application requires increased attention of the research engineer.

Key words: digital technologies, spectral analysis, digital data processing, time series, signals, oscillations, disturbances, application packages, MATLAB.

Ishmuratov Rashid Aminovich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, rash-i@mail.ru, Russia, Kazan, Kazan State Power Engineering University,

Zaripova Rimma Soltanovna, candidate of technical sciences, docent, zarim@rambler.ru, Russia, Kazan, Kazan State Power Engineering University

УДК 621.396.4
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-442-443

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ МНОГОКАНАЛЬНОЙ РАДИОСВЯЗИ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

Д.А. Антропов

Обоснована актуальность совершенствования конструкций широкополосных антенн метрового и дециметрового диапазонов длин волн и предложены технические решения, позволяющие улучшить электрические характеристики перспективных антенно-фидерных устройств радиорелейной связи, размещенных в районах со сложной электромагнитной обстановкой, экстремальными природно-климатическими условиями.

Ключевые слова: щелевая антенна, коэффициент усиления антенны, коэффициент бегущей волны, диапазонное свойство, многоканальная радиосвязь, радиорелейная связь.

Многоканальные средства радиосвязи играют важнейшую роль в общей инфраструктуре связи нашей страны [1-3]. Среди них особое место занимают средства и комплексы радиорелейной связи прямой видимости. Такие системы позволяют обеспечивать высокоскоростной обмен большими массивами информации между потребителями в условиях сложной пересеченной местности, отсутствия стационарных линий связи и экстремальных природно-климатических условиях [4-6].

Повышение эффективности функционирования систем радиорелейной связи является актуальной задачей особенно для отдаленных регионов Российской Федерации, где в настоящее время развернуты масштабные комплексные целевые программы по дальнейшему экономическому развитию, добыче полезных ископаемых, прокладке и обслуживанию протяженных нефте - и газопроводов и целому ряду других работ, имеющих стратегическое значение [1-6].

Современная инфраструктура связи характеризуется весьма сложной электромагнитной обстановкой. Одновременная работа большого количества групп радиосредств в различных диапазонах радиоволн требует выполнения высоких требований по обеспечению их электромагнитной совместимости. Кроме того, на эффективность функционирования средств радиорелейной связи в значительной степени влияют, порой трудно прогнозируемые природно-климатические условия районов эксплуатации этой техники и аппаратуры многоканальной радиосвязи.

В сложившихся сложных, а порой и экстремальных условиях эксплуатации важную роль играют технические характеристики антенно-фидерных устройств средств и комплексов многоканальной радиосвязи.

Проведенный анализ ряда известных защищенных антенных конструкций, работающих с использованием участков метрового и дециметрового диапазонов радиоволн, показал следующее.

Известны логопериодические вибраторные антенны метрового и дециметрового диапазонов длин волн, предназначенные для обеспечения радиосвязи в обычных условиях эксплуатации, размещаемых на стационарных и выдвижных специальных опорах [7-10].

Однако эти антенны не в полном объеме удовлетворяют требованиям по своим основным электрическим характеристикам при увеличении используемого частотного диапазона в условиях интенсивного воздействия групповых радиопомех, а также физической надежности конструкции антенны в сложных условиях эксплуатации: высоких уровнях ветровых и сейсмических нагрузок.

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве ближайшего прототипа, является щелевая антенна [11]. В такой щелевой антенне с логопериодической структурой построения излучающая часть размещается в плоскости раздела двух сред «воздух - земля».

Все излучатели прорезаны в трапециевидной металлической крышке эндовибратора и имеют особую линейную клиновидную щелевую форму с окружностью на заостренном конце. Кроме того, используется симметричная кабельная собирательная линия с кольцевыми разрезами в диэлектрике и металлическом экране – оплетке, длины которых совпадают с диаметрами окружностей клиновидных щелевых излучателей, ортогональными к продольной оси клиновидного щелевого излучателя.

В конструкции такой логопериодической антенны в качестве активных и пассивных вибраторов применены особые клиновидные щелевые излучатели, в которых поперечные размеры кольцевых разрезов кабельной собирательной линии являются местами возбуждения щелей, прорезанных в трапециевидной металлической крышке эндовибратора.

В целях изоляции от земли и среднего уровня сейсмических нагрузок металлический эндовибратор, глубиной в один метр, полностью заполняется пеноэпоксидом. При высоком уровне сейсмических нагрузок эндовибратор заполняется полимербетоном марки ФАЭД. От температурных нагрузок и дождя антенна сверху на 10 см прикрывается слоем термостойкого пеноэпоксида. Вместе с тем, в случае ожидаемых максимальных сейсмонагрузок пеноэпоксид в эндовибраторе будет заменяться на брикеты из высокопрочного бетона.

Однако такая антенна также не удовлетворяет высоким требованиям по обеспечению устойчивой и качественной связи в условиях возникающей сложной электромагнитной обстановки районов эксплуатации антенно-фидерных устройств и приемо-передающего оборудования, массированного воздействия групповых радиопомех как искусственного, так и природного происхождения.

В целях устранения указанного недостатка в новой конструкции антенны применяются еще три щелевые антенны расположенных в горизонтальной плоскости, смещенных относительно друг друга на 90 градусов, а также коммутатор, содержащий четыре входа коаксиальных кабелей от соответствующих приемо-передающих устройств и четыре выхода коаксиальных кабелей на используемые щелевые антенные устройства.

На рис. 1 показана конструкция щелевой широкополосной антенны логопериодической структуры, принятая в качестве прототипа, расположенной в плоскости раздела двух сред «воздух - земля».

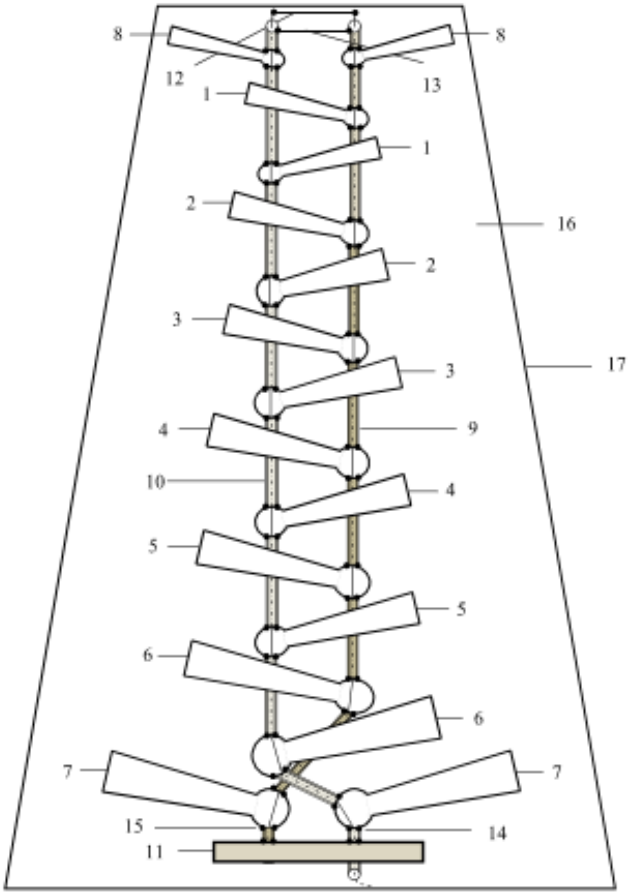


Рис. 1. Щелевая антенна

Антенна состоит из вырезанных в трапециевидной металлической крышке 16 эндовибратора шести активных 1-6 и двух пассивных 7 и 8 щелевых V-образных излучателей вытянутой клиновидной формы с заканчивающимися на заостренных концах окружностями, центральные провода 9 и 10 радиочастотных кабелей и их экранные оболочки, образующих симметричную собирательную линию, размещаются под металлической крышкой эндовибратора.

В начале антенны центральные проводы кабелей 9 и 10 соединены металлической перемычкой 12, а их экранные оболочки соединены металлической перемычкой 13. Также металлическая перемычка 11 устанавливается на конце антенны на расстоянии 1/8 максимальной длины волны диапазона антенны.

При этом позиция 14 - одно из мест подключения кольцевых разрезов экранной оболочки левого кабеля симметричной собирательной линии к соответствующим щелевым излучателям, а позиция 15 - одно из мест подключения кольцевых разрезов экранной оболочки правого кабеля симметричной собирательной линии к соответствующим щелевым излучателям.

Сам же металлический эндовибратор, размещенный под металлической крышкой, глубиной один метр, полностью заполняется пеноэпоксидом, а при сейсмоперегрузках - высокопрочным бетоном.

На предложенную автором статьи конструкцию антенны получен патент на изобретение «Щелевая антенна» [11].

На рис. 2 показана новая конструкция комбинированной щелевой широкополосной антенны.

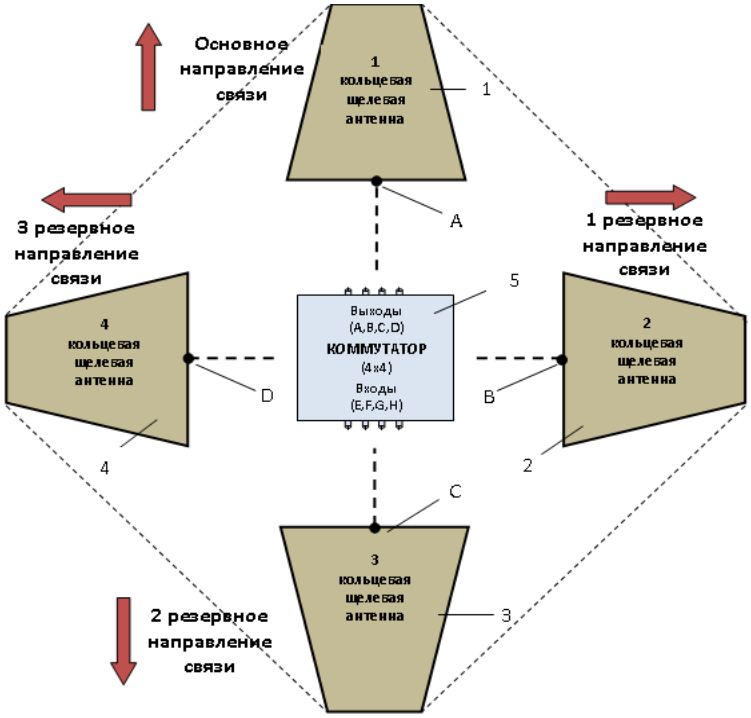


Рис. 2. Комбинированная щелевая антенна

Такая антенна, расположенной в плоскости раздела двух сред «воздух - земля» в рамках условного квадрата, включающей в себя щелевую антенну 1 основного направления связи, подобную по своей структуре прототипу, три дополнительные щелевые антенны 2, 3, 4 резервных направлений связи такой же структуры как и щелевая антенна 1, размещенных в горизонтальной плоскости со сдвигом 90 градусов, коммутатор коаксиальных кабелей 5.

При этом щелевая антенна 1 основного направления связи состоит из вырезанных в трапециевидной металлической крышке эндовибратора шести активных и двух пассивных щелевых V-образных излучателей вытянутой клиновидной формы с заканчивающимися на заостренных концах окружностями, центральные провода кабелей и их экранные оболочки, образующих симметричную собирательную линию, размещаются под металлической крышкой эндовибратора.

В начале антенны 1 центральные проводы кабелей соединены перемычкой, а их экранные оболочки также соединены металлической перемычкой. Также металлическая перемычка устанавливается на конце антенны на расстоянии 1/8 максимальной длины волны диапазона антенны.

Металлический эндовибратор, размещенный под металлической крышкой, глубиной один метр, полностью заполняется пеноэпоксидом, а при сейсмоперегрузках - высокопрочным бетоном.

Коммутатор обеспечивает коммутацию четырех входов радиочастотных кабелей от приемо-передающих устройств E, F, G, H и четырех выходов на радиочастотные кабели A основной антенны 1 и радиочастотные кабели B, C, D трех дополнительных антенн 2, 3, 4.

Техническим результатом является повышение коэффициента исправного действия канала связи в сложной помеховой обстановке, интенсивного воздействия групповых радиопомех искусственного и природного происхождения в чрезвычайных природно-климатических условиях.

Полученный технический результат может быть использован при выполнении комплекса мероприятий радиоэлектронной защиты в ходе массированного воздействия групповых радиоэлектронных помех различного происхождения на вход антенны, а также при разработке новых типов высокозащищенных антенно-фидерных устройств.

Новая конструкция комбинированной щелевой антенны на выбранном участке диапазонов метрового и дециметрового диапазонов длин волн 70-1500 МГц работает следующим образом.

При подключении высокочастотной энергии одного из четырех передающих устройств через один из входов коммутатора E, F, G, H к выходу коммутатора A и далее с помощью несимметричного фидера A к щелевой антенне 1 основного направления связи высокочастотная энергия распространяется по нему и входит в левый кабель симметричной собирательной линии A, имеющий кольцевые разрезы в экране и диэлектрике, и возбуждает левую половину щелевых излучателей антенны.

При наличии перемычек между двумя кабелями симметричной собирательной линии появляется возможность посредством кольцевых разрезов в экране и диэлектрике во втором кабеле возбуждать щелевые клиновидные излучатели правой половины антенны.

При появлении групповых радиопомех в азимутальном направлении основного направления связи щелевой антенны A с помощью высокочастотного коммутатора в ручном или программируемом режимах высокочастотная энергия от передающих устройств E, F, G, H может быть переключена на одну из других дополнительных щелевых антенн B, C или D, на азимутальных направлениях которых отсутствуют групповые радиопомехи.

При условии обеспечения необходимого частотного разноса информационных сигналов, а также отсутствия одиночных и групповых радиопомех новая конструкция комбинированной антенны также обеспечивает возможность одновременной работы не только одного, но и двух, трех и четырех передатчиков на четыре щелевые антенны, имеющих узкие диаграммы направленности.

В целом, высокочастотный коммутатор комбинированной щелевой антенны позволяет в ручном или программном режимах обеспечивать коммутацию высокочастотной энергии от четырех передающих устройств

к четырем щелевым антеннам в зависимости от складывающейся помеховой обстановки на направлениях связи.

Проведенные исследования и макетные испытания показали, что предложенная конструкция новой комбинированной щелевой логопериодической антенны обеспечивает повышение коэффициента исправного действия канала связи в условиях сложной помеховой обстановки в экстремальных природно-климатических условиях районов эксплуатации.

На предложенную автором статьи новую конструкцию антенны подана установленным порядком заявка на получение патента Российской Федерации на изобретение «Комбинированная щелевая антенна» № 2023115509 от 14 июня 2023 г.

Таким образом, поставленная цель - разработка новой конструкции антенны, позволяющей повысить коэффициент исправного действия канала связи в условиях сложной помеховой обстановки районов эксплуатации, интенсивного воздействия групповых радиопомех искусственного и природного происхождения в чрезвычайных природно-климатических условиях, достигнута.

Технико-экономический эффект, обусловленный применением предложенной конструкции антенны, заключается в возможности повышения эффективности выполнения поставленных актуальных технических задач в условиях воздействия различных отрицательных факторов как искусственного, так и естественного природного происхождения. Величина технико-экономического эффекта зависит от способов организации сетей и направлений связи в комплексах и системах радио- и радиорелейной связи различного назначения.

Список литературы

1. Пищальников С.М., Пуха Г.П., Черноиванов С.А., Хохлов Г.Г. Вариант организации помехозащищенной связи при управлении силами ВМФ // Морская радиоэлектроника. 2024. № 1 (87). С. 28-32.

2. Soldatov E.S., Bogomolov A.V. Digital models, sensor network and autonomous telemetry modules for cryogenic storage systems // Journal of Computational and Engineering Mathematics. 2024. Vol. 11. No 1. P. 34-48.

3. Чумаров С., Игнатьев Д. Построение технологической радиосвязи на основе базовых станций и радиорелейной связи // Беспроводные технологии. 2021. № 1 (62). С. 41-43.

4. Карпенко Н.В., Вовк С.В. Подход к оценке пропускной способности радиоцентров магистральной декаметровой радиосвязи // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2024. № S1 (45). С. 210-216.

5. Солдатов Е.С., Богомолов А.В., Ларкин Е.В., Солдатов А.С. Сенсорные сети контроля состояния авиационной техники при испытаниях и эксплуатации // Авиакосмическое приборостроение. 2024. № 2. С. 61-68.

6. Мельников Н.М., Никишкин А.В., Брагиш А.В., Ветрова Е.В. Возможности применения передовых технологий в области связи для органов внутренних дел // Информатизация и связь. 2024. № 1. С. 16-20.

7. Фидельман В.Е. Патент Российской Федерации на изобретение «Логопериодическая вибраторная антенна», № 2189676, опубл. 20.09.2002. Бюл. № 26.

8. Антропов Д.А., Перфилов О.Ю., Фидельман В.Е. Разработка новых видов логопериодических вибраторных антенн с улучшенными техническими характеристиками // Антенны. 2018. № 9 (253). С. 16 – 20.

9. Петров Б.М., Костромитин Г.И., Горемыкин Е.В. Логопериодические вибраторные антенны. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия - Телеком, 2005.

10. Войтович Н.И., Клыгач Д.С., Репин Н.Н. Патент Российской Федерации на изобретение «Широкополосная турникетная антенна», № 2401492, опубл. 10.10.2010. Бюл. № 28.

11. Антропов Д.А. Патент Российской Федерации на изобретение «Щелевая антенна», № 2780297, опубл. 21.09.2022. Бюл. № 27.

Антропов Дмитрий Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, vnkantropov@mail.ru, Россия, Москва, Академии военных наук

METHODOLOGICAL APPROACHES TO IMPROVE THE OPERATING EFFICIENCY OF MULTI-CHANNEL RADIO COMMUNICATION SYSTEMS UNDER COMPLEX ELECTROMAGNETIC CONDITIONS

D.A. Antropov

The relevance of improving the designs of broadband antennas of the meter and decimeter wavelength ranges is justified and technical solutions are proposed to improve the electrical performance of advanced antenna-feeder radio relay communication devices placed in areas with difficult electrical and climatic conditions people.

Key words: slit antenna, antenna gain, traveling wave coefficient, band property, multichannel radio communication, radio relay communication.

Antropov Dmitry Alekseevich, candidat of technical science, docent, vnkantropov@mail.ru, Russia, Moscow, Academy of military Sciences

УДК 34.4414
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-449-450

ОРГАНИЗАЦИОННО-ПРАВОВОЙ ФЕНОМЕН СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

М.Н. Болгов, Н.В. Болгов

В статье представлены выводы из анализа организационно-правового феномена системы искусственного интеллекта, позволяющей решать задачи в основных сферах человеческой деятельности, охарактеризованы математические и психофизиологические аспекты искусственного интеллекта, а также правовые аспекты его регулирования.

Ключевые слова: искусственный интеллект, цифровая экономика, математические аспекты искусственного интеллекта, психофизиологические аспекты искусственного интеллекта, правовые аспекты регулирования искусственного интеллекта.

На современном этапе развития цивилизации искусственный интеллект играет огромную роль во многих отраслях человеческой деятельности. Развитие систем искусственного интеллекта остается актуальным, поскольку способствует его дальнейшему совершенствованию и внедрению в новые сферы человеческой жизни. Перед системами искусственного интеллекта ставятся все новые задачи, благодаря чему он является востребованным и перспективным направлением научной деятельности и находит реальное воплощение в экономике и других отраслях народного хозяйства [1-3].

В соответствии с распоряжением Правительства РФ от 28 июля 2017 года № 1632-р «Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации»» искусственный интеллект отнесен к основным сквозным цифровым технологиям. Одно из частных определений искусственного интеллекта – способность системы создавать в ходе самообучения программы для решения задач определенного класса сложности и решать эти задачи [4].

Развитие искусственного интеллекта характеризуется автоматизированным принятием решения на высоком интеллектуальном уровне в системе, позволяющей добиваться наибольшей эффективности в различных областях человеческой деятельности, знания о которой хранятся в памяти такой системы. Создание интеллектуальной системы, которая способна решать востребованные задачи человеческой деятельности, позволит применять их в той или иной предметной области. Строение интеллектуальной системы можно представить, как информационную базу, синхронизирующую блок оценки и интеллектуальный интерфейс, позволяющий принимать решение посредством интеллектуальных систем. При этом способность системы адекватно анализировать обрабатываемые данные, самообучаться при помощи адаптации к новым условиям решаемой проблемы является непременным условием развития искусственного интеллекта [5].

В Российской Федерации законодательное закрепление понятия «искусственный интеллект» содержится в пункте 5 «Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года», утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 года № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации», где искусственный интеллект определяется как комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека. 27 января 2017 года разработана концепция первого в России законопроекта о робототехнике [6].

Математические аспекты искусственного интеллекта. В настоящее время многие ученые оперируют понятием «искусственный интеллект» как необходимым инструментом для эффективного решения различных задач, в том числе в области цифровой экономики. Это направление принято считать задачей аппаратного или программного моделирования – научной деятельности, которая является интеллектуальной. Свойство интеллектуальной деятельности – выполнять творческие функции, которые присущи человеку и опираются на философские познания мира. В настоящее время не решен вопрос о природе и статусе человеческого интеллекта, нет и точного критерия достижения компьютерами «разумности», что позволяет нам установить научную проблему.

Ученые Университета Бригама Янга (США) и Массачусетского технологического института (США) создали искусственную систему, которая превосходит человека в переговорном процессе [7]. Профессор Я.Крэнделл, отмечал, что «в обществе отношения постоянно портятся, и люди, которые были друзьями в течение многих лет, внезапно становятся врагами. Поскольку машине зачастую удается в лучшей степени достигнуть компромисса, чем нам, искусственный интеллект может научить нас, как это лучше сделать» [7].

Попытки привязать человеческое мышление к языку логики и математики известны давно. Р. Луллий, один из мыслителей позднего средневековья, основатель комбинаторики, строил систему рассуждений «механистически» с помощью изобретенных им кругов [8]. Американский философ Р. Карнап предложил методологию исследований, формализации и изложения языком логики и математики в эмпирике, назвав ее конституционной [9].

При формировании нового знания о предмете исследования необходимо провести анализ предметной области и определения интеллекта для проведения исследования. Так, американский физик М. Тегмарк определил: «Интеллект – это способность достигать сложные цели» [10]. Между тем, если понятие искусственного интеллекта представляется возможным, то научная проблема в рамках предмета исследования в настоящее время не получила должного обоснования и сводит искусственный интеллект

к математизируемым процедурам. Американские ученые Р.Стюарт и П.Норвиг указывают, что компьютеры могут выполнять многие действия столь же успешно или даже лучше, чем люди, включая такие работы, в которых, по мнению людей, требуется огромная человеческая прозорливость и понимание [11].

Психофизиологические аспекты искусственного интеллекта. В прошлом и настоящем времени многих ученых мира интересовал вопрос устройства человеческого сознания: как скопление нервных клеток и электрические импульсы между ними создают человеческое сознание. Было проведено много исследований с целью создания искусственного интеллекта – переноса «головного мозга» в компьютер.

В свое время физиолог И.П.Павлов утверждал буквально следующее: «Значит мышление до известного пункта ничего другого не представляет, как ассоциации, сперва элементарные, стоящие в связи с внешними предметами, а потом – цепи ассоциаций» [12].

М.Тегмарк пишет, что «интеллект в конечном счете определяется информацией и вычислениями, а не плотью, кровью или атомами углерода, то есть нет никаких фундаментальных причин, по которым машины однажды не смогут стать хотя бы такими же умными, как мы» [11]. Алгоритмы глубокого обучения демонстрируют превосходство над человеком при решении ряда специализированных задач по распознаванию образов и других задач [13, 14].

Несмотря на утверждение, что физическое мышление отличается от мышления математического, его основа определяется сознанием, что получило подтверждение в работах И.П. Павлова [15]. Сложность описания мышления языком математики состоит, по мнению С. Рассела, в том, что довольно сложно взять любые неформальные знания и выразить их в формальных терминах, требуемых для системы логических обозначений, особенно если эти знания не являются полностью достоверными [11].

Создание алгоритмов, способных распознать человеческую речь по активности головного мозга, еще один серьезный шаг, сделанный в сторону создания искусственного интеллекта [16]. Триумф математического знания, все глубже и глубже проникающего во все сферы человеческой жизни, заставляет пересматривать уже устоявшиеся установки и традиции работа «бездушных машин», основанная на математических алгоритмах, невообразимо далека от творческого, нелинейного человеческого мышления.

Американский ученый Р.А. Познер в рамках анализа доказательств по уголовному делу предлагает смоделировать установление факта как проблему поиска, аналогичную поиску потребительских товаров, при котором правильный ответ на вопрос о том, например, действительно ли X застрелил Y, аналогичен максимизирующему полезность выбора между двумя марками посудомоечных машин [17].

Человек наделен когнитивными способностями, он может познавать мир, приобретать знания. Российский математик А.А.Ляпунов утверждал: «Действительно ценные знания составляются не из того, о чем человек

слышал, а из того, чем он умеет пользоваться» [18], то есть использовать умения для достижения целей как средства. Аристотель в сочинении «Никомахова этика» пришел к парадоксальному выводу, что часто человек выбирает не цели, а лишь средства их достижения. Но сам подход, в вычленении действия, направленного на достижение цели, сомнений не вызывает [11]. Однако подобная векторная направленность свойственна даже современным компьютерным программам, не связанным с искусственным интеллектом.

Знание человека о работе головного мозга и происходящих в нем процессах мышления несмотря на ощутимый прогресс, достигнутый за последние десятилетия, остается до конца не исследованным. Происходящие в сознании процессы не подконтрольны другим субъектам мыслительной деятельности и в подавляющем большинстве случаев определяются возможностью других членов социума мыслить путем переноса, экстраполяции свои качеств на окружающих. Аналогия дает нам возможность предположить, что некто другой, примерно такой же, как и я сам, устроен, мыслит и действует подобно мне. Накопленный эмпирический материал подтверждает наши предположения.

В повседневной жизни мы не получаем каких-либо прямых свидетельств о мыслительной деятельности других людей. А. Тьюринг в исследовании предложил: «Вместо ведения бесконечных споров на эту тему обычно принято заключать джентльменское соглашение и считать, что мыслят все» [11]. Безусловно, существуют и другие точки зрения. Немецкий философ Ф.Шлейермахер полагал, что потребность и возможность понимания другого человека обусловлены единым субстратом человеческой природы [19].

Между тем создание интеллектуальной искусственной системы, которая способна решать проблемы в основных сферах человеческой деятельности, позволит применять ее в той или иной предметной области, знания о которой хранятся в памяти такой системы [20-23].

Принятие эффективного решения искусственным интеллектом является наиболее сложной научной проблемой, стоящей перед учеными, которые должны адаптировать систему искусственного интеллекта к осуществлению контроля принимаемого решения, что позволит выполнять важнейшую функцию управления. В системе контроля искусственного интеллекта необходимо опираться на философские исследования с адаптацией и выведением философской мысли с использованием латеральных способностей ученых [5, 13].

При решении этой научной проблемы приходится сталкиваться с правовым основанием этой деятельности, что поставит перед нами задачу, которая потребует определения вопроса возможной правосубъектности искусственного интеллекта. Недостаточность такого подхода заключается в том, что полноценный анализ зарождающегося, принципиально нового правового явления невозможно провести, не затронув таких аспектов, как деление на живое – неживое, искусственное – неискусственное и ряда других смежных проблем. «Кембрийский взрыв» терминологии в области

искусственного интеллекта, к сожалению, совершенно не способствует разрешению возникающих затруднений, определения, вырабатываемые исследователями, становятся все более громоздкими и все менее функциональными [24].

При рассмотрении правового здания, возводимого человечеством наряду со способностью понимать, проступает вторая фундаментальная часть – способность руководить своими действиями. При этом необходимым фундаментом исследования должна быть философия как наука, которая является особой формой познания и системой знаний об общих характеристиках, понятиях и принципах реальности, которая всегда была и есть основой научного познания. Философия – относительная наука, актуальная во все времена, поскольку человека всегда интересовал вопрос устройства мира, живой природы. Как из скопления атомов возникают клетки, ткани, органы, организмы, как устроено сознание человека, как из биохимических реакций и электрических импульсов возникают мысли, чувства, эмоции – философские вопросы бесконечны. Необходимо отметить исследования Р.Б. Головкина, который обосновывает наличие таких сущностей, как юридические инстинкты, связывая врожденные свойства личности и социальные, в том числе юридические факторы поведения [25].

Такой подход представляется обоснованным, но между тем человек наделен инстинктами. И.П. Павлов выделял даже рефлексы (инстинкты) свободы и рабства [12], что позволяет сделать вывод: в эволюционном развитии социального общества не всегда были правовые механизмы регулирования, в том числе правосубъектности человека.

Р.А.Познер, пытаясь обосновать значение эмоций для правового дискурса, утверждает: «Оценочная функция эмоции подразумевает, что неспособность отреагировать на определенную ситуацию определенной эмоцией может указывать не на превосходящую силу ума, а на проблемы с пониманием или, в случае моралистических эмоций, таких как сострадание и негодование, – на отказ от нравственных норм общества» [17], «разум не обладает мотивирующей силой; чтобы действие было произведено, знание о том, как правильно поступить, должно соединиться с желанием поступить правильно» [17]. Это утверждение приводит к смешению понятий «эмоции» и «воля», между тем волевой компонент связан с эмоциональным, но последним не охватывается.

Следует отметить, что выделить грань, которая вкладывается в понятия «воля», «эмоция» «эмоционально-волевое», возможно при определенных условиях. И.П. Павлов так формулировал проблему: «Кто отделил бы в безусловных сложнейших рефлексах (инстинктах) физиологическое соматическое от психического, т. е. от переживаний могучих эмоций голода, полового влечения, гнева и т.д.?» [12].

Но даже если принять такую точку зрения, то инстинкт уже подразумевает своего рода программу, предустановку, что совершенно укладывается в логику правового формирования норм искусственного интеллекта.

На сегодняшний день разработано немало моделей в рамках формализации эмоций.

В то же время нельзя согласиться с авторами, связывающими юридическую ответственность с эмоциями и на основании этого делающими вывод, что, поскольку существование искусственных эмоций современные культура и наука не допускают, то на этом основании в правовые субъекты роботам путь закрыт [26]. При всей важности эмоций, правом оформлена исключительно способность осознавать и руководить своими действиями.

Советский и российский ученый В.С.Нерсесянц определяет: «Деликтоспособность физических лиц выражает их способность (в соответствии с их возрастом и состоянием здоровья) совершать сознательно-волевые действия, осознавать смысл своих поступков и руководить ими, т. е. быть подлинным автором таких действий (бездействия), которые могут быть вменены ему в ответственность как субъекту правонарушения» [27].

Правовые аспекты регулирования искусственного интеллекта. Эмоциональную составляющую в подавляющем большинстве случаев можно считать юридически нейтральной. Более того, отсутствие у людей эмоционального переживания, как таковой неспособности испытывать эмоции (к примеру, в результате аутизма), совершенно не означает, что они будут как-то ограничены в правоспособности.

Советский ученый В.А. Ойгензихт указывает, что нельзя отождествлять волю в правовом смысле со всем комплексным набором психических актов, таких как стремление, выбор, цель и т. д., однако рассматривая волевой феномен применительно к праву, пишет: «Особенность заключается в том, что волевая деятельность в указанной сфере связана с принимаемыми решениями, а они соотносятся с нормами, их требованиями, которые заставляют оценивать и выбирать» [28]. В.А. Ойгензихт определяет: требования нормы – оценка и выбор поведенческого решения, что как нельзя лучше согласуется с алгоритмизацией [28].

Также необходимо рассмотреть работы автора психологической теории права Л.И. Петражицкого, пытавшегося вывести природу правовых норм из почти кантианского основания об этических переживаниях, эмоций которых имеют атрибутивный характер [28]. Однако даже сам Л.И. Петражицкий признавал отсутствие объективной возможности узнать, что происходит в психике (душе) другого индивида. Происходящее в сознании другого человека для нас недоступно, мы можем только строить предположения. Но человек проявляет себя и свой внутренний мысленный мир во внешнюю среду посредством деятельности. Именно то, как человек выглядит, что говорит и делает, создает образ его личности в глазах окружающих.

А.Г. Братко подчеркивает, что цель создания у искусственного разума эмоционального ядра, в частности способности сопереживать и симпатизировать людям, не достижима [30], – это имеет значение для понимания интеллекта, в то время как для конструкций в плоскости современной юридической практики, эмоциональный базис субъекта не является характеризующим.

Заключение. Таким образом из проведенного анализа можно сделать вывод: происходящие на наших глазах изменения представляют собой революционный скачок в развитии цивилизации, современные исследователи обязаны приблизить науку и технику к созданию полноценного искусственного интеллекта, аналогичного человеческому разуму, для чего необходимы совместные исследования с биомедицинскими научными организациями, изучающими деятельность мозга человека, а также необходимо вырабатывать правовую основу правосубъектности искусственного интеллекта:

проработать вопрос регламентации деятельности искусственного интеллекта: вправе ли системы добывать, обрабатывать и хранить информацию о персональных данных граждан, иную охраняемую законом информацию;

регламентировать права, обязанности и ответственность операторов искусственного интеллекта в совершении правонарушений;

определить правовые основы самостоятельного принятия решения без вмешательства человека, уточнения деятельности оператора в контрольных функциях, а также принятии решений, правовой регламентации порядка осуществления контроля за деятельностью искусственного интеллекта и предоставления объективной информации владельцу, контролирующим и надзирающим органам;

определить субъектов, которые вправе владеть и использовать технологии искусственного интеллекта, чтобы такого рода системы были в свободном доступе, тем самым вышли из-под контроля правообладателя.

Также важнейшей задачей правового регулирования деятельности системы искусственного интеллекта является ответственность правообладателя за его работу при наличии причинно-следственной связи с действиями оператора по контролю его деятельности.

Список литературы

1. Славин Б.Б. Общий искусственный интеллект: архитектурный подход // Искусственный интеллект. Теория и практика. 2023. № 3 (3). С. 20-27.

2. Медведев Д.А. Искусственный интеллект как субъект права: деликтоспособность искусственного интеллекта // Вестник Российского нового университета. Серия: Человек и общество. 2023. № 4. С. 146-151.

3. Казарян В.П., Шутова К.Ю. Этические риски в практике искусственного интеллекта // Идеи и идеалы. 2023. Т. 15. № 2-2. С. 346-364.

4. Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. Толковый словарь по искусственному интеллекту. М.: Радио и связь, 1992. 256 с.

5. Гершман А.М. Заблуждения искусственного интеллекта. [Электронный ресурс] URL: http://postnauka.ru (дата обращения:15.01.2023).

6. Dentons разработала первый в России законопроект о робототехнике. [Электронный ресурс] URL: https://www.dentons.com/ru/insights/alerts/2017/january/27/dentons-develops-first-robotics-draft-law-in-russia (дата обращения:15.01.2023).

7. Тьюринг А. Может ли машина мыслить? М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. 67 с.

8. Wilson R., Watkins J.J. Combinatorics: Ancient & Modern. Oxford University Press, 2013. 368 p.

9. Carnap R. Der logishe Aurfbau der Welt. Meiner, 1998. 290 p.

10. Тегмарк М. Жизнь 3.0: быть человеком в эпоху искусственного интеллекта. М.: АСТ CORPUS, 2019. 560 с.

11. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. СПб: Диалектика, 2019. 1408 с.

12. Павлов И.П. Рефлекс свободы. М.: Книжный клуб Книговек, 2011. 448 с.

13. Каляев И.А. Как измерить искусственный интеллект? // Искусственный интеллект и принятие решений. 2023. № 1. С. 3-11.

14. Аггарвал Ч. Нейронные сети и глубокое обучение: учебный курс. СПб: Диалектика 2020. 752 с.

15. Терентьева Л.Н. Системно-параметрическая модель развития научной теории // Республиканский межведомственный научный сборник. Вып. 77 «Основные принципы построения научных теорий». Киев, Выща Школа, 1988. С. 12.

16. Информационный ресурс Nature [Электронный ресурс] URL: https://www.nature.com/articles/s41593-020-0608-8#Bib1 (дата обращения: 25.12.2023).

17. Познер Р.А. Рубежи теории права. М.: Высшая школа экономики, 2020. 480 с.

18. Ляпунов А.А. Онтодидактика в математике // Газета «За науку в Сибири». № 37. 20.09.1972.

19. Ляпушкина Е.И. Литературная герменевтика: теория и практика. СПб: Росток, 2020. 397 с.

20. Golosovskiy M., Bogomolov A., Balandov M. Algorithm for configuring sugeno-type fuzzy inference systems based on the nearest neighbor method for use in cyber-physical systems // Studies in Systems, Decision and Control. 2022. Vol. 417. Pp. 83-97.

21. Голосовский М.С., Богомолов А.В., Баландов М.Е. Оптимизированный алгоритм нечеткого логического вывода для систем типа Сугено // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2022. № 9. С. 22-29.

22. Tobin D., Bogomolov A., Golosovskiy M. Model of organization of software testing for cyber-physical systems // Studies in Systems, Decision and Control. 2022. Т. 418. С. 51-60.

23. Голосовский М.С., Богомолов А.В., Теребов Д.С., Евтушенко Е.В. Алгоритм настройки системы нечёткого логического вывода типа Мамдани // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2018. Т. 10. № 3. С. 19-29.

24. Морхат П.М. Право и искусственный интеллект. М.: Юрсервиттум, 2021. 514 с.

25. Головкин Р.Б. Актуальные проблемы теории правового регулирования. М.: Юрайт, 2020. 304 с.

26. Архипов В.В., Наумов В.Б. О некоторых вопросах теоретических оснований развития законодательства о робототехнике: аспекты воли и правосубъектности // Закон. 2017. № 5. С. 157–170.

27. Нерсесянц В.С. Общая теория права и государства: учебник для вузов. М.: 2002. 519 с.

28. Ойгензихт В.А. Мораль и право: Взаимодействие. Регулирование. Поступок. Душанбе: Ирфон, 1987. 156 с.

29. Петражицкий Л.И. Новые основания логики и классификация наук // Российский ежегодник теории права, 2008. № 1. С. 825-846.

30. Братко А.Г. Искусственный разум, правовая система и функции государства. М.: ИНФРА-М, 2021. 282 с.

Болгов Михаил Николаевич, студент, s22v_bolgov@179.ru, Москва. Россия, Высшая школа экономики,

Болгов Николай Васильевич, д-р полит. наук, главный научный сотрудник, 4182803@mail.ru, Россия, Москва, Департамент техники и научно-исследовательской деятельности Федеральной службы войск национальной гвардии Российской Федерации

ORGANIZATIONAL AND LEGAL PHENOMENON OF CREATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

M.N. Bolgov, N.V. Bolgov

The article presents conclusions from the analysis of the organizational and legal phenomenon of an artificial intelligence system that allows solving problems in the main areas of human activity, characterizes the mathematical and psychophysiological aspects of artificial intelligence, as well as the legal aspects of its regulation.

Key words: artificial intelligence, digital economy, mathematical aspects of artificial intelligence, psychophysiological aspects of artificial intelligence, legal aspects of regulation of artificial intelligence.

Michail Nikolaevich Bolgov, student, s22v_bolgov@179.ru, Russia, Moscow, High School of Economics,

Nicolay Vasilyevich Bolgov, doctor of sciences (politics), chief researcher, 4182803@mail.ru, Russia, Moscow, Department of Technology and Research Activity Federal Service of the National Guard Troops of the Russian Federation

УДК 629.7.05
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-458-459

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕТЧИКА В ПОЛЕТЕ

М.В. Дворников, А.В. Богомолов, С.В. Кучевский

Предложен метод автоматизированного контроля состояния летчика в полете на основе разработанной математической модели качества ручного пилотирования воздушного в условиях воздействия факторов полета. Применение метода позволяет своевременно идентифицировать потенциально опасные изменения состояния летчика, в зависимости от которых принимать решения по продолжению ручного управления, по передаче управления воздушным судном автоматике или по управлению состоянием летчика имеющимися на борту штатными средствами обеспечения жизнедеятельности.

Ключевые слова: воздушное судно, факторы полета, система обеспечения жизнедеятельности, состояние летчика, контроль состояния летчика, управление воздушным судном.

Анализ опыта применения государственной авиации свидетельствует о необходимости парирования повышенной утомляемости летного состава и обеспечения надежности авиационной техники с учетом человеческого фактора [1, 2]. Современные воздушные суда (ВС) за счет экономичности силовой установки и высоким аэродинамических качеств успешно совершают длительные беспосадочные полеты продолжительностью: в зависимости от решаемых задач, летчик может находиться в воздухе 6-12 часов [1]. При этом в процессе полета на летчика воздействуют многократные интенсивные разнонаправленные перегрузки [3].

Рассматривая систему «ВС-летчик-среда», наиболее слабым и сложно прогнозируемым звеном является летчик [4-6]. Из-за особенностей профессиональной деятельности к нему предъявляют особые требования, превышающие на отдельных этапах полета его функциональные возможности, как физиологические, так и психоэмоциональные, которые, при отсутствии специальных средств оптимизации функционального состояния летчика, приводят к выходу из строя всей системы [3, 7-9].

Еще одним немало важным фактором безопасности полета являются действия летчика, который может парировать последствия, возникающих не по его вине неблагоприятных факторов с одной стороны, а с другой стороны летчик может допускать ошибки при пилотировании, которые не всегда парируются [2]. В свою очередь, успешность действий летчика обуславливается располагаемыми возможностями и резервами организма в возникающих стрессовых ситуациях [3].

Попытка облегчить пилотирование привела к конструктивным усложнениям ВС, которые, без достаточного учета психофизиологических возможностей летчика, привели к тому, что даже опытные, хорошо обученные и тренированные летчики в полете допускают серьезные ошибки,

особенно в стрессовых ситуациях и при воздействии на него факторов полета [2]. Основным способом поддержания адекватного состояния летчика при воздействии на него факторов полета является применение системы обеспечения жизнедеятельности (СОЖ), которая входит в состав системы «ВС-летчик-среда» и является ее неотъемлемой частью [2-4].

Научно обоснованное решение возникшей проблемы соответствия характеристик авиационной техники возможностям летчика и его взаимодействия с внешней средой требует применения методов количественной оценки влияния на эффективность функционирования системы «ВС-летчик-среда» как отдельных факторов, так и их совокупности [2, 10-12].

Исходя из этого, требуется разработка адекватных математических моделей системы «ВС-летчик-среда», учитывающих большое число определяющих факторов, обеспечивая высокую достоверность получаемых результатов и оценок [12]. Реализация сложных математических моделей и алгоритмов с помощью бортовых цифровых вычислительных машин позволяет проводить анализ состояния авиационной техники в полете, оценивать состояние летчика и работу СОЖ, а также осуществлять управление элементами СОЖ и состоянием летчика [8, 9, 13-15]. По результатам функционирования разработанного алгоритма сформируются следующие решения: принятие решения на корректировку состояния летчика; снижение задействования летчика в процессе управления; перераспределение средств ВС (перераспределение забортного воздуха для создания дополнительного давления в гермокабине, подача дополнительного воздуха в бортовой кислорододобывающей установке, перераспределение управляющих действий при пилотировании в критических ситуациях и т.д.), исключение летчика от процесса управления [16, 17].

Так как основными элементами управления являются ВС и летчик, то разрабатываемую математическую модель целесообразно представить, как эргатическую (человеко-машинную) систему «ВС-летчик» и рассматривать два основных элемента: «технический» и «человеческий».

Каждый из этих элементов характеризуется множеством параметров $\left\{x_i^T, x_j^Ч\right\}, i=\overline{1,n};\ j=\overline{1,m}$, значения которых принадлежат соответственно некоторым множествам T и $Ч$ [12]. Пусть показатель качества ЭС описывается некоторой функцией:

$$W = f\left(\left\{x_i^T\right\}, \left\{x_j^Ч\right\}, a_l, b_k, \ldots\right),$$

где a_l, b_k – параметры, определяющие зависимость показателя W от решаемой задачи, условий функционирования и др.

Функции $f\left(\left\{x_i^T\right\}, \left\{x_j^Ч\right\}, a_l, b_k, \ldots\right)$ изменяются при изменении значений x_i^T и $x_j^Ч$. Тогда максимальное значение показателя качества функционирования следует рассматривать как исходное условие для определения необходимого соответствия техники и человека, т.е. условие max$W$ является критерием функционального соответствия основных элементов (как технического, так и человеческого) эргатической системы «ВС-летчик).

Для упрощенного восприятия и дальнейшего использования в вычислениях вводится обозначение $\max W \equiv W^*$ и общие показатели функционального соответствия элементов эргатической системы двух типов: показатель точности

$$\delta W = W - W^*,$$

где W – реализуемое значение показателя качества функционирования и показатель надежности $p(a \le \delta W \le b)$, где p – вероятность того, что значение δW не выйдет в процессе функционирования за допустимые пределы (a, b).

Учитывая введенные обозначения критерий функционального соответствия элементов ЭС «ВС-летчик» имеет вид:

$$\min \delta W; \quad \max p(a \le \delta W \le b),$$

Принимая во внимание, что функциональные возможности летчика ограничены [2, 3], то при решении задачи обеспечения соответствия ВС и летчика при моделировании их совместной работы требуется учитывать характеристики летчика (быстродействие, способность воспринимать и обрабатывать информацию при различных внешних условиях, надежность, точность действий и психофизиологическая напряженность) при которых, вне зависимости от типа ВС, не происходили бы нарушения установленных условий функционального соответствия:

$$\delta W \le \delta W^*; \quad p(a \le \delta W \le b) \ge p*,$$

где δW^* и $p*$ – установленные предельные значения показателей соответствия для рассматриваемого типа ВС.

Таким образом, назначение δW^* и $p*$ осуществляется исходя из соображений обеспечения безопасности полетов и выполнения полетного задания. При этом показатели основываются на соответствии характеристик ВС возможностям летчика и представляют синтез – заданные характеристики состояния летчика в полете и его действия по управлению ВС и летно-технические характеристики ВС, что обеспечивает требуемый уровень безопасности полетов за счет реализации управляющих действий, позволяющих компенсировать воздействие на летчика факторов полета [8, 9].

Наиболее сложно реализуемой математической моделью является модель действий летчика по управлению ВС. Она должна быть достаточно детализирована для того, чтобы учитывать даже малые изменения характеристик и свойств управления ВС летчиком и получать индивидуальные оценки по каждым действиям. Имеющиеся статистические данные по парированию возникающих факторов полета, которые основываются на использовании данных эксплуатации однотипных ВС, интегрально учитывают возможности летчиков как парировать отрицательные последствия неблагоприятных факторов, так и выполнять управление ВС при воздействии различных факторов полета на летчика, позволяют представить модель его действий в формализованном виде. Такая модель содержит качественное описание действий летчика и их количественные характеристики.

В настоящее время разработаны математические модели летчика для нормальных условий деятельности [2]. Также известны модели действий

пилота для условий полета, в которых произошли особые ситуации (отказ техники и т.д.), но рассмотренные модели не позволяют производить оценку действий летчика при воздействии на него факторов полета (перегрузка, перепад давления, утомляемость и т.д.) [2]. В таком случае, структура модели оценивания действий летчика будет ограничена конкретными особыми ситуациями. В общем виде, переходные интенсивности определяются как предел отношения:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_{ij}(t)}{\Delta t},$$

где $P_{ij}(t)$ – переходные вероятности, определяемые статистическими данными.

Особенностью оценивания действий летчика заключается в минимизации времени на принятие решений при пилотировании (отклонение ручки управления, отклонение педалей, реакция на возникающие возмущения и т.д.). Под ним следует понимать отрезок времени с момента возникновения возмущения до начала его парирования летчиком.

При оптимальных условиях, такое время индивидуально для каждого летчика и изменяется в небольших пределах. В свою очередь, увеличение времени принятия решения (или действия, несоответствующие сложившейся ситуации) сигнализирует об ухудшении состояния летчика и, как следствие, принятии неправильного решения. Принятие решений определяется как процесс выбора лучшей альтернативы [13].

Описание процесса реализации принятых решений основано на использовании времени *t*, параметров состояний $\{x_i\}$, входных воздействий $\{x_{вхi}\}$, управляющие воздействия $\{u_k\}$ и психофизиологических характеристик $\{b_l\}$. Управление формируется на основании оценки рассогласований текущего и заданного значений управляемых параметров:

$$u(t) = Q\left\{x_{зад}(t), x(t)\right\},$$

где *Q* – оператор, отображающий процесс восприятия информации (время реакции летчика).

Прогнозирование значения выходного сигнала *y(t)* осуществляется на основании:

$$y(t) = G\left\{t, x(t_{вых_i}), x_{зад}(t_{вых_i})\right\},$$

где $t_{вых_i}$ – момент выполнения равенства $\left|\Delta x\right| = \Delta x_0$ при условии, что $\left|\Delta x\right| > \Delta x_0$; Δx_0 – пороговое значение рассогласования.

Применение выведенных выражений позволяют описать и оценить управляющую деятельность летчика [12]. Соответственно, под действием управляющего сигнала *u(t)* изменяется текущее состояние объекта управления. Его целесообразно разделить на спокойное (без возмущений) состояние:

$$x(t) = H_2\left\{t, x(t_{вых_i}), u(t), b_2\right\}, \text{ при } t \in \left[t_{вых_i}, t_i\right];$$

при воздействии возмущений:

$$x(t) = H_1\left\{t, H_2\left[t, x(t_{вых_i}), u(t), b_1\right], x(t), b_2\right\}.$$

Так как основным критерием является время на принятие решений летчиком при пилотировании ВС, то в зависимости от ситуации (без возмущения или при воздействии возмущения) оно будет различным, но одинаковым для каждого взятого летчика, и выходной сигнал формируется как

$$y(t) = G\left\{t, x_{ij}, x(t_{вых_i})\right\},$$

где $x_{ij}(t) = Q\left\{x_{зад}(t) = x_j, x(t) = x_i\right\}$ при $t \in \left[t_{i_0} + \Delta t, t_{ij}\right]$.

Полученное выражение позволяет оценить процесс принятия решения летчиком при пилотировании и выявить отклонения в его состоянии.

Основные неблагоприятные факторы полета, оказывающие воздействие на состояние летчика, влияют на интенсивность и длительность выполнения операций при пилотировании. Интенсивность пилотирования представим:

$$\overline{t}_j = t_{Пj} / t_{pj},$$

где $t_{Пj}$ – время, требуемое летчику для выполнения операций пилотирования, а

$$t_{pj} = t'_{pj}(1 - \overline{t}_{\varphi}),$$

где t'_{pj} – время, отведенное для выполнение операций пилотирования.

Поскольку ухудшение характеристик работоспособности пилотирования при воздействии факторов полета выражается в увеличении времени на выполнение операций пилотирования, то интенсивность пилотирования при выполнении типовых операций будет увеличиваться. Учитывая, что чем дольше и чаще происходит воздействие факторов полета на летчика, то более выраженным становится ухудшение его состояния .

На основании решения дифференциального уравнения, описывающего динамику ухудшения состояния летчика и, как следствие, его реакцию на действия пилотирования, получим:

$$\Delta Q = C_T(\exp(C_{1j}T_j) - \exp(C_{1j}T_{j-1})),$$

где T – продолжительность работы летчика; T_j и T_{j-1} – начало и конец операций пилотирования; C_{1j} и C_T – постоянные, которые зависят от интенсивности воздействия факторов полета и условий деятельности летчика.

Учитывая, что C_{1j} характеризует изменение состояние летчика, значение изменяется от дозы и экспозиции действующих факторов полета и изменением работоспособности летчика. При этом необходимо учитывать биологическую систему адаптации организма летчика к возникающим внешним условиям и возможность оптимизации его состояния техническими средствами ВС и защитным снаряжением.

В зависимости от времени реакции и выполнения операций пилотирования выделяют три режима деятельности летчика:

нормальный при $\overline{t}_j$ J $\overline{t}_1(t_{nj}$ J $t_{pj}\overline{t}_1)$,

экстремальный при $\overline{t}_1 < \overline{t}_j \le \overline{t}_2(t_{pj}\overline{t}_1 < t_{nj} \le t_{pj}\overline{t}_2)$

и сверхэкстремальный $\overline{t_j} > \overline{t_2}(t_{nj} > t_{pj}t_1)$.

Таким образом, представленный метод позволяет автоматизировано контролировать состояние летчика при выполнении операций пилотирования, своевременно идентифицировать изменения его состояния, в зависимости от которых принимать решения либо продолжении полета в текущем режиме, либо об оптимизации управления ВС (передача управления автоматике), либо о принудительном управлении состоянием летчика имеющимися на борту штатными средствами обеспечения жизнедеятельности.

Список литературы

1. Ермолин О.В., Зубов Н.П., Фомин М.В. Применение ударной авиации Воздушно-космических сил в военных конфликтах будущего // Военная мысль. 2023

2. Рискометрия функциональной надежности летчика. М.: Физматлит, 2022. 288 с.

3. Кучевский С.В. Дворников М.В., Писарев А.А. Состояние и перспективы развития системы обеспечения жизнедеятельности экипажа боевого воздушного судна // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки / Под ред. В.Н. Букова. Воронеж: Научная книга, 2020. С. 270–279.

4. Кучевский С.В., Гервальд А.В., Хромин А.Ю. Задача обеспечения жизнедеятельности экипажа и ее влияние на безопасность полетов // Сборник материалов X Всероссийской педагогической научно-методической конференции «Проблемные вопросы военного образования и пути совершенствования подготовки военных специалистов». Киров: МЦИТО, 2024. С. 33-

5. Айвазян С.А., Солдатов А.С., Есев А.А., Ткачук А.В., Зыкин А.П. Прикладные аспекты синтеза интерактивных систем управления эргатическими авиационными комплексами // Двойные технологии. 2014. № 1 (66). С. 56-58.

6. Алешин С.В., Алпатов И.М., Анисимов А.Н., Артемов В.Н. и др. Человек и безопасность полетов: сборник статей. М.: Когито-Центр, 2013. 288 с.

7. Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И., Зыбин Е.Ю., Гласов В.В. Перспективные направления развития бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2023. № 1 (60). С. 13-29.

8. Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Гузий А.Г. Принципы построения системы обеспечения жизнедеятельности операторов систем "человек-машина", адаптивных к их функциональному состоянию // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С. 50-54.

9. Гузий А.Г., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В. Методология стабилизации функционального состояния оператора системы "человек-машина" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 5. С. 9-14.

10. Крохин З.Т., Скрипник Ф.И., Шестаков В.З. Инженерно-организационные основы обеспечения безопасности полетов в гражданской авиации. М.: Транспорт, 1987. 175 с.

11. Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Земкин В.А. Авиационные человеко-машинные интерфейсы: состояние и перспективы развития // Ресурсы конкурентоспособности спортсменов: теория и практика реализации. 2022. № 10. С. 211.

12. Цибулевский И.Е. Человек как звено следящей системы. М.: Наука, 1981. 288 с.

13. Кучевский С.В. Анализ состояния информационно-измерительных систем контроля состояния экипажей воздушных судов // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 9. С. 40-45.

14. Ушаков И.Б., Богомолов А.В. Диагностика функциональных состояний человека в приоритетных исследованиях отечественных физиологических школ // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2021. № 3. С. 91-100.

15. Солдатов Е.С., Богомолов А.В., Ларкин Е.В., Солдатов А.С. Сенсорные сети контроля состояния авиационной техники при испытаниях и эксплуатации // Авиакосмическое приборостроение. 2024. № 2. С. 61-68.

16. Жданько И.М., Коронков С.О., Филатов В.Н., Никифоров Д.А., Кальманов А.С., Ремизов Ю.И., Зуева Л.В., Авдеева Т.С., Богомолов А.В. Методические подходы к психофизиологическому нормированию сложности полётных заданий // Проблемы безопасности полетов. 2024. № 7. С. 11-28.

17. Коронков С.О. Методика автоматизированного исследования рабочей нагрузки летчика вертолета // Программные системы и вычислительные методы. 2022. № 4. С. 63-74.

Дворников Михаил Вячеславович, д-р мед. наук, профессор, начальник отдела, dvormv@yandex.ru, Россия, Москва, Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Министерства обороны Российской Федерации.

Богомолов Алексей Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, a.v.bogomolov@gmail.com, Россия, Москва, Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Министерства обороны Российской Федерации,

Кучевский Семён Викторович, канд. техн. наук, старший преподаватель, faust2@bk.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

METHOD FOR AUTOMATED PILOT CONDITION CONTROL IN FLIGHT

M.V. Dvornikov, A.V. Bogomolov, S.V. Kuchevsky

A method for automated pilot condition control in flight is proposed based on the developed mathematical model of aerial manual piloting quality under conditions of exposure to flight factors. The application of the method allows for the timely identification of potentially

dangerous pilot condition changes, depending on which to make decisions to continue manual control, to transfer control of the airship to automation, or to control the pilot condition by the personal safety equipment available on board.

Key words: aircraft, flight factors, life support system, pilot condition, pilot condition control, aircraft control.

Dvornikov Mikhail Vyacheslavovich, doctor of medical sciences, professor, head of department, dvormv@yandex.ru, Russia, Moscow, Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

Bogomolov Alexey Valerevich, doctor of technical sciences, professor, chief researcher, a.v.bogomolov@gmail.com, Russia, Moscow, Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

Kuchevsky Semyon Viktorovich, candidate of technical sciences, senior lecturer, faust2@bk.ru, Russia, Voronezh, Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Military Air Academy Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin"

УДК 629.7.05
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-465-466

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОТОРНЫХ ДЕЙСТВИЙ ЛЕТЧИКА ПРИ ПИЛОТИРОВАНИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

С.В. Кучевский

В статье рассматривается моделирование действий летчика при пилотировании воздушного судна, представляемого в виде человеко-машинной системы, при воздействии факторов полета. Предложено формализованное математическое описание нестационарных моторных действий летчика, позволяющее прогнозировать его моторные действия и поведение при управлении воздушным судном.

Ключевые слова: человеко-машинная система, воздушное судно, моторные действия летчика, поведение летчика, фактор полета.

Моделирование современных воздушных судов (ВС) как человеко-машинных (эргатических) систем не представляется возможным без учета человека-оператора в лице летчика [1-3]. Любой вариант построения систем автоматизированного управления ВС относится к классу человеко-машинных систем – летчик не может быть исключен из контура управления [4-6]. Но при этом обеспечение рационального взаимодействия летчика со средствами автоматизации является одной из проблем проектирования систем автоматизированного управления ВС, которая требует особого внимания и представляет трудности при проектировании [7, 8].

Физическим обоснованием необходимости учета нестационарности динамических свойств летчика в рассматриваемой особой ситуации являются особенности его моторных действий при воздействии на него внешних факторов [9, 10]:

1. Внезапный выход летчика из стационарных действий при пилотировании в состояние активных моторных действий нестационарного характера.

2. При возникновении ситуаций, связанных с внезапным для летчика изменением динамических свойств ВС, к которым он вынужден адаптироваться.

Сложность описания модели действий летчика заключается в наличии большого уровня «шумов» при представлении его свойств стационарной передаточной функцией. В стационарном виде дифференциальное уравнение имеет вид [9]:

$$a_3\dddot{X}_{П0}(t) + a_2\ddot{X}_{П0}(t) + \dot{X}_{П0}(t) = b_2\ddot{x}_2(t) + b_1\dot{x}(t) + b_0x(t),$$

Для того, чтобы записать уравнение корректно, необходимо учитывать нестационарность моторных действий зависимостью коэффициентов уравнения b_2, b_1, b_0 от времени. Основанием является то, что входные сигналы для летчика остаются неизменными независимо от того, какие действия он предпринимает – нестационарные или стационарные. К таким сигналам следует отнести: $x(t)$ – позиционные; $\dot{x}(t)$ – скорость изменения входного позиционного сигнала; $\ddot{x}(t)$ – ускорение. Изменяемые во времени коэффициенты $b_2(t), b_1(t), b_0(t)$ характеризуют веса которые придает летчик входному сигналу, его первой и второй производным в процессе парирования возмущенного движения ВС [11].

Таким образом, нестационарная модель пилота имеет вид:

$$a_3\dddot{X}_{П0}(t) + a_2\ddot{X}_{П0}(t) + \dot{X}_{П0}(t) = b_2(t)\ddot{x}_2(t) + b_1(t)\dot{x}(t) + b_0(t)x(t).$$

Подтверждение адекватности представленной модели и определение ее параметров заключается в том, чтобы определить минимум расхождений между реальными записями выходных $X_П(t)$ и входных $x(t)$ сигналов длительности T и модели летчика $X_{П0}(t)$. Так как коэффициенты b_2, b_1, b_0 являются функциями времени, то их можно определить для текущего момента времени в пределах T разность $X_П(t)$ и $X_{П0}(t)$ была нулевой. В свою очередь, представленные коэффициенты не соответствуют реальному процессу формирования летчиком управляющих воздействий, так как он неспособен мгновенно изменять динамические свойства.

$$I = \int_{t_0}^{t_k} \left[X_П(t) - X_{П0}(t)\right]^2 \varphi(t_1, \tau)dt = \min,$$

где $X_{П(t)}, X_{П0}(t)$ – выходные сигналы летчика и модели; $\varphi(t, \tau)$ – функция, с помощью которой отфильтровывается информация о входном и выходном сигналах на предыдущих участках интервала t_{k-1}, t_k.

Рассмотренная функция имеет вид:

$$\varphi(t, \tau) = \begin{vmatrix} 0 & при\ \ \tau < t_{k-1}; \\ 1 & при\ \ t_{k-1} \le \tau \le t_k. \end{vmatrix}$$

Нестационарная передаточная функция летчика имеет вид $W_{П}(D,t)$ и определяется дифференциальным уравнением [11]:

$$Q(D)W_{П}(D,t) = R(D,t) + N\left\{W_{П}(D,t)\right\},$$

где

$$Q(D) = a_3D^3 + a_2D^2 + D;\ R(D,t) = b_2(t)D^2 + b_1(t)D + b_0(t);$$

$$N\left\{W_{П}(D,t)\right\} = -\left[\frac{dQ}{dD}\frac{dW}{dt} + \frac{1}{2!}\frac{d^2Q}{dD^2}\frac{d^2W}{dt^2} + \frac{1}{3}\frac{d^3Q}{dD^3}\frac{d^3W}{dt^3}\right].$$

Решение этого уравнения представляется в виде ряда:

$$W_{П}(D,t) = W_{П0}(D,t) + W_{П1}(D,t) + ...,$$

где

$$W_{П0}(D,t) = R(D,t)/Q(D);\ W_{П1}(D,t) = N\left\{W_{П0}(D,t)/Q(D)\right\};$$

$$W_{Пi}(D,t) = N\left\{W_{Пi-1}(D,t)/Q(D)\right\}.$$

Приняв во внимание допущение о постоянстве коэффициентов на временных подынтервалах t_{k-1}, t_k, то коэффициенты на границах этих подынтегралов будут иметь разрывы первого рода, таким образом:

$$N\left\{W_{П}(D,t)\right\} \equiv 0.$$

Отсюда следует, что искомая нестационарная передаточная функция летчика является передаточной функцией нулевого приближения:

$$W_{П}(D,t) = W_{П0}(D,t) = \frac{b_0(t) + b_1(t)D + b_2(t)D^2}{D + a_2D^2 + a_3D^3} = \frac{b_0(t) + b_1(t)D + b_2(t)D^2}{D(1+T_ND)(1+T_3D)}.$$

В этой передаточной функции $T_N = 0{,}1$ с, коэффициент T_3 случаен по множеству, а коэффициент $b_0(t)$, $b_1(t)$, $b_2(t)$ – случайные функции времени. В совокупности коэффициенты передаточной функции образуют векторную случайную функцию и, следовательно. Передаточная функция будет количественно определена, если будут определены количественные характеристики рассматриваемой функции:

$m_{b0}(t), m_{b1}(t), m_{b2}(t), m_{T_3}$ – математические ожидания коэффициентов;

$k_{b0}(t_1,t_2), k_{b1}(t_1,t_2), k_{b2}(t_1,t_2)$ – корреляционные функции коэффициентов;

$k_{ij}(t_1,t_2)$ – взаимокорреляционные функции между коэффициентами, $i \neq j$.

На подынтервалах стационаризации t_{k-1}, t_k передаточную функцию представим разложением:

$$W_{П}(D) = \frac{A_1}{D} + \frac{A_2}{T_ND+1} + \frac{A_3}{T_3D+1}.$$

Тогда выходной сигнал модели летчика $X_{П0}(t)$ представляется суммой сигналов:

$$X_{П0}(t) = A_1\int_{t_0}^{t_k} x(\tau)d\tau + A_2\int_{t_0}^{t_k} x(\tau)e^{-\frac{t-\tau}{T_N}}d\tau + A_3\int_{t_0}^{t_k} x(\tau)e^{-\frac{t-\tau}{T_3}}d\tau.$$

Система уравнений для отыскания значений коэффициентов модели на подынтервалах стационаризации t_{k-1}, t_k формируется из условий:

$$\frac{\partial I}{\partial A_1}=0;\ \frac{\partial I}{\partial A_2}=0;\ \frac{\partial I}{\partial A_3}=0;\ \frac{\partial I}{\partial T_3}=0.$$

Неизвестные коэффициенты модели b_0, b_1, b_2 определяют по соотношениям:

$$b_0 = A_1 T_N T_3;$$
$$b_1 = A_1(T_N + T_3) + A_2 T_N + A_3 T_3;$$
$$b_2 = (A_1 + A_2 + A_3) T_N T_3.$$

Наиболее сложным в определении коэффициентов модели является выбор подынтервалов их стационаризации.

Ответная реакция у летчика при парировании воздействии на него факторов полета формируется в виде отдельных перемещений органов управления, которые можно назвать тактами управления [10, 12-14]. Продолжительность таких тактов – случайная величина. При этом, действия летчика осуществляются дискретно и их изменения происходят от такта к такту. Это позволяет идентифицировать изменение коэффициентов нестационарной модели летчика таким образом, чтобы обеспечить наилучшее в смысле минимума критерия отслеживания выходного сигнала летчика на каждом такте управления.

Нормированные составляющие векторной случайной функции этих параметров представляют собой стационарные случайные функции. Причем вероятностная зависимость между ними практически отсутствуют, то есть эти функции в вероятностном смысле не связаны друг с другом. Нестационарность функций $b_0(t)$, $b_1(t)$, $b_2(t)$ заключается в зависимости от времени их математических ожиданий и дисперсий. Поэтому их можно представить комбинацией функций:

$$b_0(t) = m_{b0}(t) + \sigma_{b0}(t) Z_{b0}(t);$$
$$b_1(t) = m_{b1}(t) + \sigma_{b1}(t) Z_{b1}(t);$$
$$b_2(t) = m_{b2}(t) + \sigma_{b2}(t) Z_{b2}(t),$$

где $Z_{bj}(t)$ – стационарная случайная функция с параметрами (0,1) и заданной корреляционной функцией $R_{zj}(\tau)$.

Зависимости $m_{bj}(t)$, $\sigma_{bj}(t)$, $R_{zj}(\tau)$ характеризуют динамику настройки динамических свойств летчика в процессе пилотирования при воздействии на него факторов полета, для их идентификации необходима информация о состоянии летчика [7, 10, 15].

Учет нестационарности действий летчика позволяет по сравнению со стационарной моделью уменьшить уровень относительных «шумов» в 3-3,5 раза. При этом относительные «шумы» не превышают 5-10 %, что позволяет сделать вывод о том, что действия летчика при воздействии на него факторов полета адекватно (с приемлемой точностью) описываются

передаточной функцией с переменными параметрами. В свою очередь, самими «шумами», так как их значения малы, при использовании разработанной модели можно пренебречь.

Таким образом, моделирование воздушного судна при воздействии на летчика факторов полета как человеко-машинной системы позволяет адекватно определить его моторные действия и спрогнозировать поведение при управлении ВС для минимизации рисков аварийных ситуаций в полете и, тем самым, повысить уровень безопасности полетов.

Список литературы

1. Кучевский С.В. Дворников М.В., Писарев А.А. Состояние и перспективы развития системы обеспечения жизнедеятельности экипажа боевого воздушного судна // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки / Под ред. В.Н. Букова. Воронеж: Научная книга, 2020. С. 270–279.

2. Айвазян С.А., Солдатов А.С., Есев А.А., Ткачук А.В., Зыкин А.П. Прикладные аспекты синтеза интерактивных систем управления эргатическими авиационными комплексами // Двойные технологии. 2014. № 1 (66). С. 56-58.

3. Алешин С.В., Алпатов И.М., Анисимов А.Н., Артемов В.Н. и др. Человек и безопасность полетов: сборник статей. М.: Когито-Центр, 2013. 288 с.

4. Гузий А.Г., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В. Методология стабилизации функционального состояния оператора системы "человек-машина" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 5. С. 9-14.

5. Кучевский С.В. Анализ состояния информационно-измерительных систем контроля состояния экипажей воздушных судов // Математические методы в технологиях и технике. 2022. №9. С. 40-45.

6. Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Гузий А.Г. Принципы построения системы обеспечения жизнедеятельности операторов систем "человек-машина", адаптивных к их функциональному состоянию // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С. 50-54.

7. Дворников М.В., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Матюшев Т.В. Технология синтеза законов управления человеко-машинными системами, эксплуатируемыми в условиях высокого риска гипоксических состояний человека // Двойные технологии. 2014. № 1 (66). С. 8-11.

8. Солдатов Е.С., Богомолов А.В., Ларкин Е.В., Солдатов А.С. Сенсорные сети контроля состояния авиационной техники при испытаниях и эксплуатации // Авиакосмическое приборостроение. 2024. № 2. С. 61-68.

9. Цибулевский И.Е. Человек как звено следящей системы. М.: Наука, 1981. 288 с.

10. Рискометрия функциональной надежности летчика. М.: Физматлит, 2022. 288 с.

11. Теория автоматического управления. Ч 1 и 2 / Под ред. А.А. Воронова. М.: Высшая школа, 1977. 304 с.

12. Богомолов А.В., Зинкин В.Н., Алёхин М.Д., Свиридюк Г.А., Келлер А.В. Информационно-логическое моделирование сбора и обработки информации при оценивании функциональной надежности оператора авиационных эргатических систем управления // Труды Третьей международной научно-практической конференции «Человеческий фактор в сложных технических системах и средах» (Эрго-2018) / Под ред. А.Н. Анохина, А.А. Обознова, П.И. Падерно, С.Ф. Сергеева. 2018. С. 315-323.

13. Кукушкин Ю.А., Дворников М.В., Богомолов А.В., Шишов А.А., Сухолитко В.А., Симоненко А.П., Степанов В.К. Особенности поддержки принятия решений по устранению особых событий и опасных состояний летчика в высотном полете // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 6. С. 74-79.

14. Марков Н.А., Богомолов А.В., Шишов А.А., Дворников М.В. Технология персонифицированного информирования о потенциальной опасности чрезвычайной ситуации в высотном полёте // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2020. Т. 7. С. 76-79.

15. Ушаков И.Б., Богомолов А.В. Диагностика функциональных состояний человека в приоритетных исследованиях отечественных физиологических школ // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2021. № 3. С. 91-100.

Кучевский Семён Викторович, канд. техн. наук, старший преподаватель, faust2@bk.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

MATHEMATICAL MODEL OF A PILOT'S MOTOR ACTIONS WHEN PILOTTING AN AIRSELF

S.V. Kuchevsky

The paper considers the simulation of pilot actions when piloting an aircraft, represented as a human-machine system, when exposed to flight factors. A formalized mathematical description of a pilot's non-steady-state motor actions is proposed, allowing the prediction of his motor actions and behavior when steering an airship.

Key words: human-machine system, airship, pilot motor actions, pilot behavior, flight factor.

Kuchevsky Semyon Viktorovich, candidate of technical sciences, senior lecturer, faust2@bk.ru, Russia, Voronezh, Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Military Air Academy Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin"

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.878.448
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-471-472

РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА

В.А. Нилов, В.А. Жулай, В.Л. Тюнин, Е.В. Федоров

Рассмотрена предложенная и запатентованная конструкция рабочего оборудования фронтального погрузчика, обеспечивающая как переднюю, так и заднюю разгрузку ковша. Новое рабочее оборудование фронтального погрузчика, позволяет выполнять погрузочные работы с разгрузкой сыпучих материалов как впереди, так и сзади колесного погрузчика, что особенно важно при эксплуатации погрузчика в стесненных условиях, кроме того, оно может устанавливаться в виде сменного оборудования и обеспечивает увеличение продольной устойчивости и производительности базового погрузчика. Рассмотренная конструкция рабочего оборудования фронтального погрузчика обеспечивает как переднюю, так и заднюю разгрузку его ковша в зависимости от размеров забоя и расположения транспортного средства и обеспечивает его работу по челночной схеме. В стеснённых условиях она позволяет существенно уменьшить время маневрирования в забое и увеличить как техническую, так и эксплуатационную производительность погрузчика. Новая конструкция обеспечивает уменьшение веса противовеса серийного погрузчика за счет наличия разгрузочного ковша и увеличение его продольной устойчивости.

Ключевые слова: фронтальный погрузчик, рабочее оборудование.

В России активно проводятся научно-исследовательские работы по модернизации и созданию новых конструкций фронтальных погрузчиков [1…12]. Определенным недостатком современных фронтальных погрузчиков является отсутствие у них задней разгрузки ковша, что снижает производительность и увеличивает износ поворотного механизма погрузчика, особенно при работе в стесненных условиях, рис. 1. На кафедре строительной техники и инженерной механики имени проф. Н.А. Ульянова Воронежского государственного технического университета предложена и запатентована [13] новая конструкция рабочего оборудования фронтального погрузчика, обеспечивающая как переднюю, так и заднюю разгрузку ковша.

Фронтальные гусеничные погрузчики, например, ПФП-1,2 на базе трактора ДТ-75, обеспечивают разгрузку ковша сзади погрузчика без его маневрирования в забое (перекидное рабочее оборудование [14]). Однако,

такое погрузочное оборудование не позволяет разгружать ковш впереди погрузчика, оно закрывает оператору обзор забоя при зачерпывании материала и не предусматривает установку на современных колесных шарнирно-сочлененных погрузчиках.



Рис. 1. Работа фронтального погрузчика в стесненных условиях

Созданное новое рабочее оборудование фронтального погрузчика [13], позволяет выполнять погрузочные работы с разгрузкой сыпучих материалов как впереди, так и сзади колесного погрузчика, рис. 2, что особенно важно при эксплуатации погрузчика в стесненных условиях, кроме того, оно может устанавливаться в виде сменного оборудования и обеспечивает увеличение продольной устойчивости и производительности базового погрузчика.

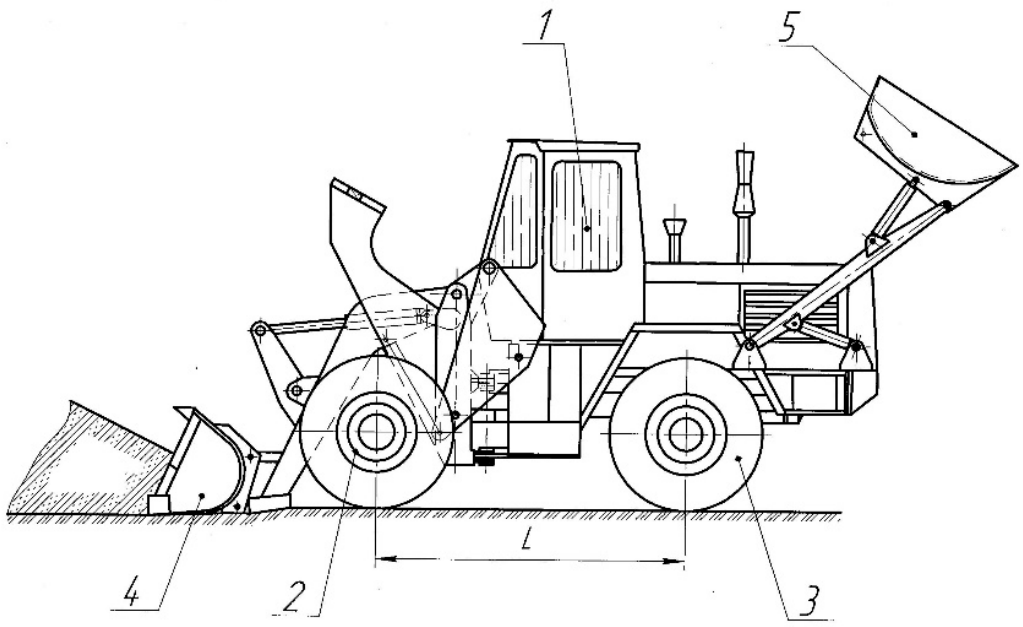


Рис. 2. Зачерпывание материала фронтальным погрузчиком

Колесный фронтальный погрузчик 1 с шарнирно-сочлененными рамами передней 2 и задней 3 снабжен разгрузочным ковшом 5, рис. 2. Зачерпывание материала происходит обычным образом за счет напорного воздействия погрузчика, совмещаемого с подъемом ковша (комбинированный способ). При этом разгрузочный ковш 5 необходимо опустить для увеличения продольной устойчивости погрузчика 1. Перемещение погрузчика 1 в забое с груженым ковшом 4 происходит при фиксации стрелы 6 на дополнительной опоре 7 фиксаторами 8. Передняя разгрузка ковша 4 происходит обычным образом за счет его поворота (рис. 3).

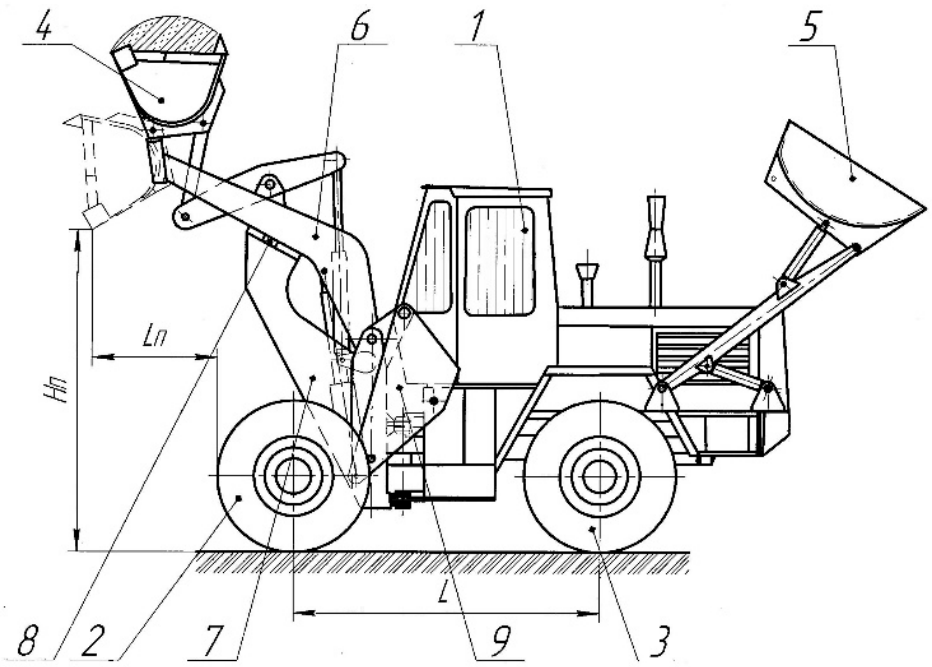


Рис. 3. Передняя разгрузка фронтальным погрузчиком

Разгрузка груженого ковша 4 назад (задняя разгрузка) осуществляется без маневрирования (поворотов и разворотов) погрузчика 1 в забое. Для её осуществления оператор проверяет надежность фиксирования стрелы 6 на дополнительные опоры 7, поворачивает опору 9 вместе с груженым ковшом 4 (против часовой стрелки) в положение перегрузки материала в разгрузочный ковш 5 (рис. 3) и поднимает разгрузочный ковш 5 в верхнее положение. Далее оператор поворотом ковша 4 пересыпает материал в разгрузочный ковш 5 (рис. 4).

После завершения операции по пересыпке материала в разгрузочный ковш 5 оператор возвращает стрелу 6 на дополнительные опоры 7 и закрепляет их фиксаторами 8. Разгрузку материала из ковша 5 позади погрузчика 1 осуществляют путем его поворота (рис. 5). Далее цикл работы погрузчика повторяется в зависимости от необходимости передней или задней разгрузки ковша.

Наблюдение за работой фронтального погрузчика «Shantui sl50w-2» на предприятии «ОАО РЖД юго-восточная дирекция по управлению терминально-складским комплексом» в стесненных условиях позволило не

только определить составляющие цикла его работы, представленные в таблице, но и установить значительное время напряженной работы механизма поворота погрузчика. Результатом этого является повышенный износ этого механизма и снижение эксплуатационной производительности погрузчика.

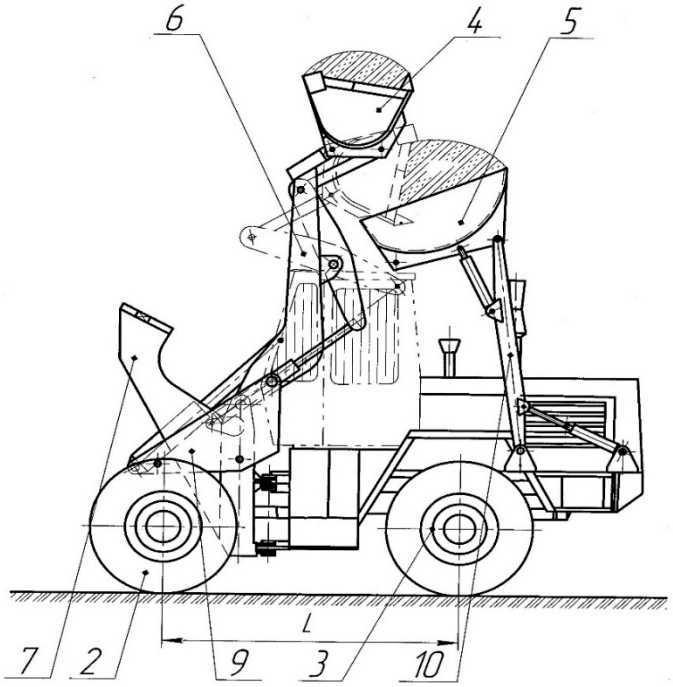


Рис. 4. Перегрузка материала

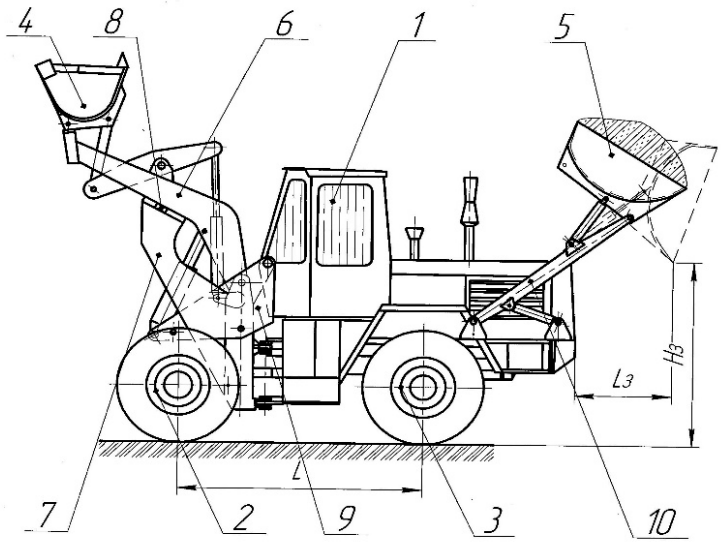


Рис. 5. Задняя разгрузка фронтальным погрузчиком

Эксплуатация нового погрузчика с двусторонней разгрузкой позволяет ему работать по челночной схеме (без разворотов), что обеспечивает сокращение времени цикла до 20 % и существенное уменьшение износа механизма поворота погрузчика, что в целом обеспечивает увеличение его как технической, так и эксплуатационной производительности.

Хронометраж работы погрузчика «Shantui sl50w-2 в стесненных условиях

п/п	Наименование операции	Время операции, сек.	
		Серийный	Новый
1	Перемещение в забой	10	10
2	Разворот в забой	3	-
3	Зачерпывание материала	6	6
4	Разворот назад	6	-
5	Разворот вперед	9	-
6	Перемещение на разгрузку	3	13
7	Разгрузка материала	2	2
8	Продолжительность цикла	39	31
9	Уменьшение времени цикла, сек./%		8/20
10	Время работы механизма поворота, сек./%	15/38,5	-

Выводы:

1. Рассмотренная конструкция рабочего оборудования фронтального погрузчика обеспечивает как переднюю, так и заднюю разгрузку его ковша в зависимости от размеров забоя и расположения транспортного средства и обеспечивает его работу по челночной схеме.

2. В стеснённых условиях она позволяет существенно уменьшить время маневрирования в забое и увеличить как техническую, так и эксплуатационную производительность погрузчика.

3. Новая конструкция обеспечивает уменьшение веса противовеса серийного погрузчика за счет наличия разгрузочного ковша и увеличение его продольной устойчивости.

Список литературы

1. Changing the approach in the construction of a mounted machine for agro-technical works / Nikishin S.A., Nemtinov V.A. // The World of Science without Borders. Proceedings of the 11th all-Russian Scientific and Practical Conference for Young Researchers with International Participation. – Tambov, 2024. – С. 100-102.

2. Конкурентный анализ погрузчиков различного типа / Мандровский К.П., Тюрин Я.И. // Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 5. С. 44–46.

3. Одноковшовые строительные погрузчики / Баловнев В.И., Данилов Р.Г. // Строительные и дорожные машины. 2019. № 4. С. 3–10.

4. Анализ геометрических параметров рабочего оборудования фронтального погрузчика в предельных положениях / Бояркина И.В. // Строительные и дорожные машины. 2023, № 6. С. 9–16.

5. Внедрение механизма системы обеспечения динамической устойчивости активного противовеса в конструкцию фронтальных погрузчиков, применяемых в тыловых подразделениях вооруженных сил / Краснов В.С., Мителёв Ю.В. // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации. 2021, № 4 (22). С. 119-126.

6. Оптимизация положения шарниров механизма подъема ковша фронтального погрузчика при выполнении цикла "погрузка-подъем-разгрузка" / Чичекин И.В., Левенков Я.Ю., Ныркова Ф.А. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023, № 2 (141). С. 97–108.

7. Определение нагрузок на механизм подъема и опрокидывания ковша фронтального погрузчика на ранних стадиях проектирования с использованием динамической модели / Чичекин И.В., Ныркова Ф.А., Чудаков О.И., Григорьев В.С. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023, № 4 (143). С. 121–130.

8. Пат. 2777639 РФ. Устройство для увеличения устойчивости погрузчика / В.А. Нилов, В.А. Жулай, Е.В. Федоров. Опубл. 08.08.2022. Бюл. № 22.

9. Повышение устойчивости и сцепных качеств фронтального погрузчика / Нилов В.А., Жулай В.А., Тюнин В.Л., Федоров Е.В. // Строительные и дорожные машины. 2022. № 9. С. 3-6.

10. Пат. 2808512 РФ. Устройство для увеличения продольной устойчивости фронтального погрузчика / В.А. Нилов, В.А. Жулай, В.А. Ныркова. Опубл. 28.11.2023. Бюл. № 34.

11. Путевая устойчивость двухосной колесной землеройно-транспортной машины при внецентренном нагружении / В.А. Жулай, В.А. Нилов, В.Л. Тюнин, А.Н. Щиенко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 1. С. 521 – 527.

12. Устройство для разгрузки металлоконструкции стрелы гидравлического экскаватора / В.А. Нилов, В.А. Жулай, Тюнин В.Л., Е.В. Федоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 5. С. 508 – 512.

13. Пат. 2823958 РФ. Рабочее оборудование фронтального погрузчика / В.А. Нилов, В.А. Жулай, В.Л. Тюнин, В.А. Ныркова. Опубл. 30.07.2024. Бюл. № 22.

14. Погрузчик фронтально-перекидной ПФП-1,2 [Электронный ресурс] URL: https://vgtzavod.com/naveska/pogruzchik-frontalno-perekidnoj-pfp-12 (дата обращения: 15.01.2025).

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,

Федоров Евгений Владимирович, канд. техн. наук, доцент, fedorov@cchgeu.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет

WORKING EQUIPMENT OF THE FRONT LOADER

V.A. Nilov, V.A. Zhulai, V.L. Tyunin, E.V. Fedorov

The proposed and patented design of the working equipment of the front loader, providing both front and rear unloading of the bucket, is considered. The new working equipment of the front loader allows you to perform loading operations with unloading of bulk materials both in front and behind the wheel loader, which is especially important when operating the loader in cramped conditions, in addition, it can be installed as replaceable equipment and provides an increase in the longitudinal stability and performance of the base loader. The considered design of the working equipment of the front loader provides both front and rear unloading of its bucket, depending on the size of the face and the location of the vehicle and ensures its operation according to the shuttle scheme. In cramped conditions, it allows you to significantly reduce the maneuvering time in the face and increase both the technical and operational performance of the loader. The new design provides a reduction in the weight of the counterweight of the serial loader due to the presence of an unloading bucket and an increase in its longitudinal stability.

Key words: front loader, working equipment.

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 of the faculty, tuninvl@yandex.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Fedorov Evgeny Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, fedorov@cchgeu.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University

УДК 629.027
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-477-478

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ МОДУЛЬНЫХ ПОДВЕСОК В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

И.А. Данилов, А.А. Иванов, С.А. Войнаш

Проанализированы представленные на рынке модульные подвески для легкового и сельскохозяйственного прицепов. Проведение анализа позволило выявить достоинства и недостатки каждого типа подвесок. Оценка достоинств и недостатков позволила предложить новый тип модульной торсионной подвески с возможностью адаптации под любые транспортные средства. Модульная торсионная подвеска представляет собой торсион наборного типа. Данный модуль возможно установить на легковые и сельскохозяйственные прицепы, для уменьшения погрузочной высоты, снижения центра тяжести и увеличения устойчивости прицепа на дороге.

Ключевые слова: подвеска, модульная подвеска, модульная торсионная подвеска.

Введение. Подвеска – совокупность деталей, узлов и механизмов, связывающих корпус машины с опорными элементами, которая предназначена для снижения динамических нагрузок и обеспечения равномерного распределения их на опорные элементы при движении.

В данный момент на рынке прицепной техники представлено большое количество модульных подвесок. Главными критериями является надежность и долговечность. Однако к критериям выбора стоит отнести эргономические характеристики. Такие, как погрузочную высоту (в большей степени к легковым прицепам), центр тяжести, возможность изменения жесткости подвески и сложность изменения жесткости подвески.

Рессорная зависимая подвеска [1].

Схема рессорной зависимой подвески приведена на рис.1. Подвеска состоит из балки и продольных полуэллиптических рессор. Как правило, снабжается гидравлическими амортизаторами. Рессоры в подвеске выполняют как функцию упругого элемента, так и функцию направляющего элемента. Такая подвеска отличается надежностью, не требует частого обслуживания [2].

К недостаткам рессорной подвески следует отнести наличие межлистового трения, вызывающего характерный пищащий звук при ходах рессоры, преждевременный износ листов рессоры и нечувствительность рессоры к мелким неровностям дороги, что для прицепов с 10 дюймовыми колесами особенно актуально.

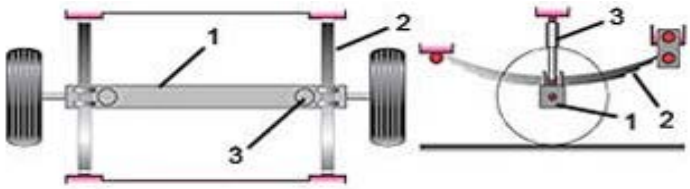


Рис. 1. Схема рессорной зависимой подвески:
1 – балка; 2 – рессора; 3 – амортизатор

Пружинная зависимая подвеска.

Пружинная зависимая подвеска прицепов для легковых автомобилей по конструкции аналогична подвеске легковых автомобилей ВАЗ классической компоновки. Схема пружинной подвески прицепа показана на рис.2.

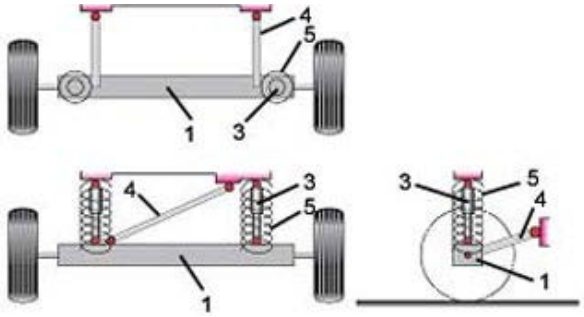


Рис. 2. Схема пружинной зависимой подвески прицепа:
1- балка; 3 – амортизатор; 4 – реактивные тяги; 5 - пружина

Пружинная зависимая подвеска отличается от рессорной тем, что в качестве упругого элемента в ней выступают пружины, а в качестве направляющего элемента – две (три) продольные и одна поперечная реактивные тяги. Пружинная подвеска проста в изготовлении, однако требует большего

обслуживания, чем рессорная, из-за необходимости частой замены резиновых элементов в шарнирах (сайлентблоках) соединения тяг с кузовом и с балкой моста [3].

Пружинная независимая подвеска.

Рычажно-пружинная независимая подвеска, схема которой показана на рис.3, имеет продольные или поперечные рычаги, цилиндрические пружины и гидравлические амортизаторы.

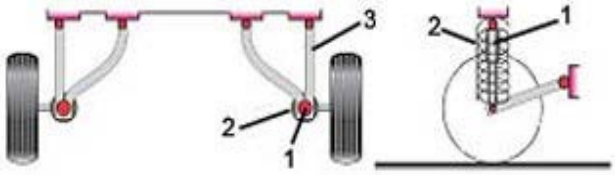


Рис. 3. Схема рычажно-пружинной независимой подвески прицепа: 1 – амортизатор; 2 – пружина; 3 - рычаг

Пружинные упругие элементы подвески имеют большие рабочие ходы, чем рессоры, и потому обеспечивают более высокую плавность хода. Целесообразность их применения на легковых автомобилях не вызывает сомнения, однако необходимость их применения на прицепах пусть даже для легковых автомобилей можно объяснить только простотой изготовления и необходимостью унификации с подвеской автомобиля тягача.

Резино-жгутовая подвеска.

В последнее время на прицепах для легковых автомобилей получили большое распространение видоизменение торсионной подвески – резино-жгутовая подвеска. Схема резино-жгутовой подвески приведена на рис.4.



Рис. 4. Схема резино-жгутовой подвески прицепа: 1 – продольный рычаг; 2 – наружная труба; 3 – резиновые жгуты

Резино-жгутовая подвеска применяется на прицепах, имеющих полную массу от 700 до 2500 кг. В качестве торсиона в таких подвесках используется резинометаллическое устройство, в котором резиновые упругие элементы работают на сжатие. Оно представляет собой две квадратные или другого профиля трубы, между которыми параллельно осям труб расположены резиновые жгуты. При взаимном повороте этих труб жгуты сжимаются, за счет чего и происходит упругое действие подвески.

К настоящему времени эта подвеска получила основное применение в европейских странах. Основные элементы этой подвески: наружная труба, внутренняя труба, три резиновых жгута и рычаг-балансир.

В резино-жгутовой подвеске резиновые элементы выполняют две задачи: пружинят и направляют колеса. Поэтому эта подвеска не нуждается в подшипниках и является более дешевой в изготовлении и в техническом обслуживании (не требует смазки и ухода).

Однако такая подвеска имеет и некоторые недостатки, в числе которых достаточно небольшой ход, то есть резино-жгутовая подвеска является короткоходовой, что и обусловило её распространение в прицепах. К недостаткам этой подвески следует отнести и проблему изготовления профилированных труб, которые могут быть изготовлены только в условиях крупных специализированных предприятий. Не случайно отечественные производители прицепов для легковых автомобилей в конструкциях прицепов используют резино-жгутовые подвески, произведенные предприятиями Западной Европы. К достоинствам резино-жгутовых подвесок следует отнести:

- высокую удельную энергоемкость, не требующую применения амортизатров;
- высокую долговечность, ограниченную только временем службы резиновых жгутов, которые в течение очень продолжительного времени не теряют свои свойства;
- незначительные затраты на техническое обслуживание или полное отсутствие таковых.

Торсионная подвеска.

Наиболее целесообразно на прицепах для легковых автомобилей применение торсионной подвески, упругий элемент которой не более сложен в изготовлении, чем пружина. Схема торсионной независимой подвески прицепа для легкового автомобиля приведена на рис.5.

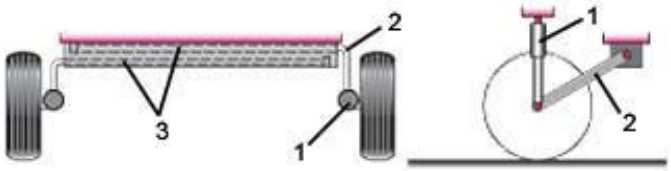


Рис. 5. Схема торсионной подвески прицепа:
1- амортизатор, 2 – продольный рычаг, 3 – торсионы

Торсионная независимая подвеска имеет установленные поперек кузова упругие металлические элементы, работающие на кручение (торсионы).

Один конец торсиона зафиксирован на кузове, а к другому крепится маятниковый рычаг со ступицей, соединенный с кузовом через амортизатор. Обеспечение необходимого рабочего хода подвески достигается подбором длины торсиона. Чем больше рабочий ход подвески, тем длиннее должны быть торсионы. Однако условию сохранности груза, транспортируемого на прицепе, удовлетворят и небольшие хода подвески, способные погасить значительные динамические удары от дороги на груз и не отразится серьезным образом на тягаче. Несомненными преимуществами торсионной подвески перед рассмотренными выше конструкциями являются:

- меньшая величина неподрессоренных масс, что обеспечивает комфортную перевозку грузов;

- меньшее пространство между осью и рамой прицепа;

- незначительные затраты на техническое обслуживание или полное отсутствие таковых. Конструктивно такая подвеска похожа на переднюю подвеску автомобиля ЗАЗ-968.

В торсионных подвесках применяются различные виды торсионов: сплошные круглого, квадратного или шестигранного сечения, а также наборные состоящие из нескольких элементов прямоугольного или круглого сечений. Наборные торсионы отличаются большей надежностью, чем торсионы сплошного сечения. Жесткость наборного торсиона примерно на 20 % ниже жесткости сплошного. Дополнительным преимуществом наборных торсионов перед сплошными является их значительно меньшая длина.

Рессорно-балансирная подвеска с реактивными штангами [4] изображена на рис.6.

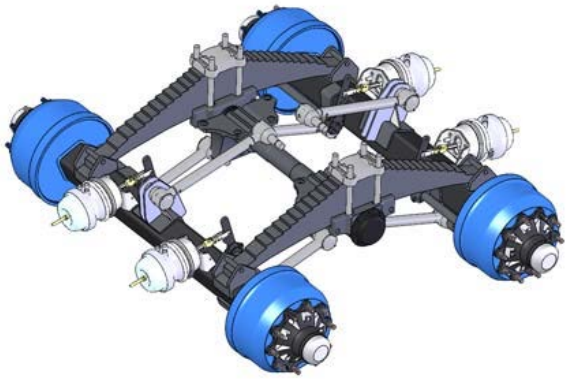


Рис. 6. Рессорно-балансирная подвеска с реактивными штангами

Преимущества:

- более мягкий и плавный ход: при наезде одного из колес на препятствие значительно снижается вертикальное перемещение несущей рамы полуприцепа

- максимальное сцепление с грунтом

- наименьшее динамическое воздействие на раму полуприцепа при работе в тяжелых условиях

- наименьший износ элементов ходовой части.

Рессорно-балансирная подвеска без реактивных штанг изображена на рис.7.

Преимущества:

- Конструктивная простота

- Отсутствие элементов, требующих постоянного обслуживания

Пневматическая подвеска изображена на рис.8.

Преимущества:

- Позволяет регулировать степень жесткости упругих элементов в зависимости от загрузки, тем самым решая проблемы плавности хода, неравномерности загрузки, изменения погрузочной высоты и т.п.

- Увеличенный ход подвески за счет удлиненной полурессоры, что положительно влияет на плавность хода

- Новый тип сайлент-блока благодаря своей геометрии обеспечивает улучшенное сцепление с поверхностью дороги.

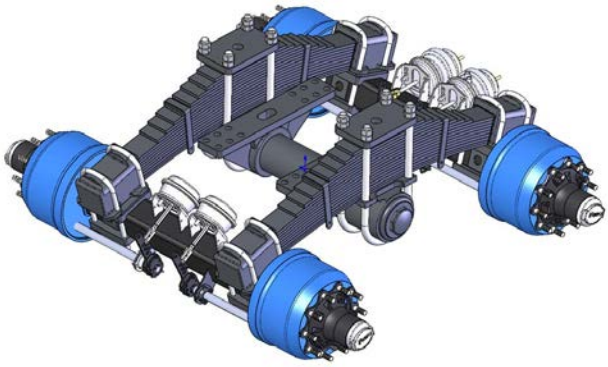


Рис. 7. Рессорно-балансирная подвеска без реактивных штанг

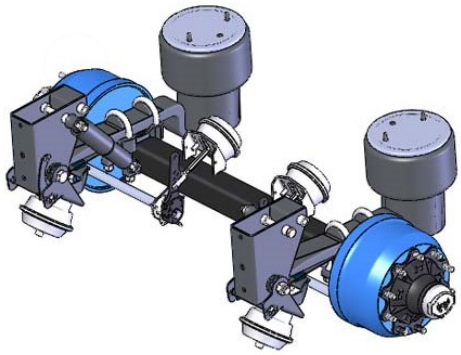


Рис. 8. Пневматическая подвеска

Модульная подвеска с наборным торсионом [5].

Модернизированная подвеска прицепа по упругим характеристикам является полным аналогом пружинной подвески прицепа, так как обеспечивает такие же ходы колес прицепа, что и при их пружинной подвеске. Конструктивно торсионная подвеска существенно отличается от пружинной. При пружинной подвеске колес на двух цилиндрических пружинах колеса прицепа устанавливались на цапфах балки оси, в торсионной подвеске каждое колесо установлено на цапфе своего продольного рычага. Иначе говоря, пружинная подвеска представляет собой зависимую подвеску, а торсионная – независимую.

При независимой подвеске каждое колесо связано с рамой прицепа посредством своего продольного рычага, качающегося относительно своей оси, и поэтому ход колеса от действия вертикальных реакций со стороны дороги никак не связан с такими же ходами другого колеса. Продольный рычаг воспринимает и передает на раму прицепа все нагрузки, действующие

на колесо со стороны дороги: и вертикальные, и горизонтальные [6]. Продольный разрез модернизированной торсионной подвески прицепа показан на рис.9.

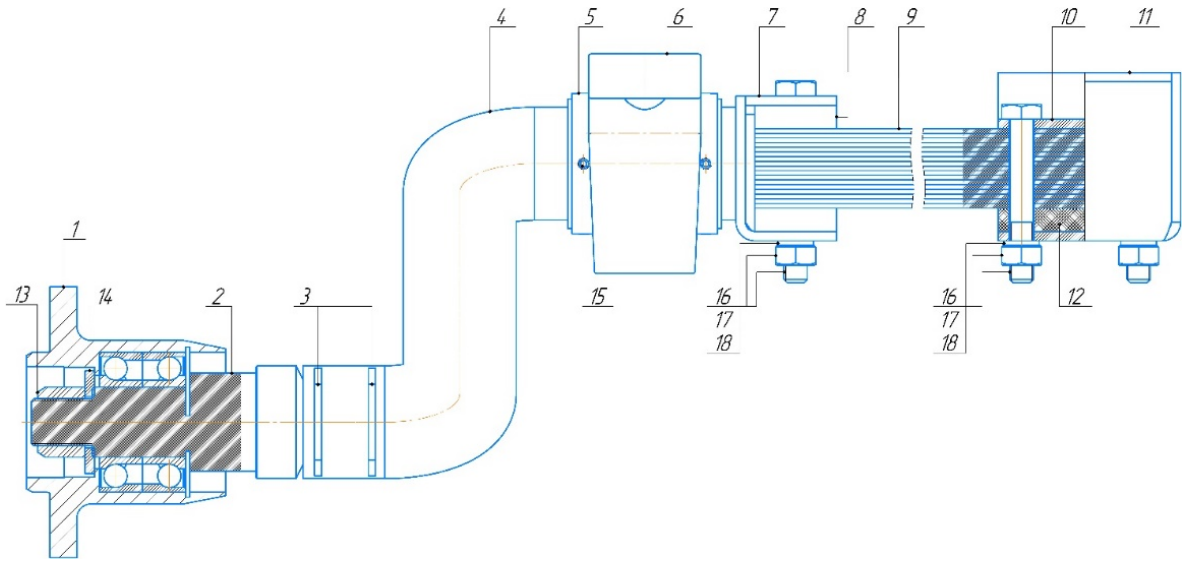


Рис. 9. Продольный разрез торсионной подвески:
1 - ступица колеса; 2 - ось ступицы; 3 - проушины крепления амортизатора; 4 - S-образная цапфа; 5 - упор подшипника; 6 - корпусной подшипник; 7 - кронштейн торсиона; 8,12 - демпферная прокладка; 9 - лист торсиона; 10 - прижимная пластина; 11 - кронштейн крепления к раме; 13-18 - метизы

Заключение. Проанализированы представленные на рынке типы модульных подвесок для легковых и сельскохозяйственных прицепов. Выделены основные достоинства и недостатки представленных вариантов. На основе анализа основных достоинств и недостатков представлена модульная торсионная подвеска. Она представляет собой установочный комплект подвески для легковых и сельскохозяйственных прицепов, который позволит улучшить плавность хода, уменьшить погрузочную высоту и повысить надежность прицепа. Благодаря применению торсиона наборного типа возможно изменить упругие характеристики подвески, тем самым увеличить грузоподъемность прицепа, а также подобрать жесткость подвески для каждого конкретного потребителя.

Список литературы

1. Подвеска прицепа: виды и характеристики [Электронный ресурс] URL: https://pricep-tmn.ru/blog/podveska-pritsepa-vidy-i-harakteristiki (дата обращения: 19.12.2024).

2. Рессоры [Электронный ресурс] URL: https://kupi-pricep.ru/blog/ressory-ili-rezinka (дата обращения: 19.12.2024).

3. Зависимая подвеска: описание, виды конструкционные особенности, отличия от независимой. [Электронный ресурс] URL: https://centr-to.ru/blog/avtoservis/zavisimaya-podveska (дата обращения: 19.12.2024).

4. Типы подвесок для прицепной техники [Электронный ресурс] URL: https://uralstz.ru/articles/tipy-podvesok-dlya-pricepnoy-tekhniki (дата обращения: 20.12.2024).

5. Модульная подвеска прицепа легкового автомобиля [Электронный ресурс] URL: https://catiz.tverlib.ru/226653 (дата обращения: 20.12.2024).

6. Сливинский Е.В., Радин С.Ю. Пути повышения эксплуатационной надёжности тяговых и прицепных рельсовых и безрельсовых транспортных средств: монография. Москва: ФЛИНТА, 2022. 186 с.

Данилов Иван Андреевич, аспирант, ivan_danilov2022@bk.ru, Россия, Тверь, Тверская государственная сельскохозяйственная академия,

Иванов Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, aivanov@tvgsha.ru, Россия, Тверь, Тверская государственная сельскохозяйственная академия,

Войнаш Сергей Александрович, младший научный сотрудник, sergey_voi@mail.ru, Россия, Рубцовск, Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

ANALYSIS OF MODULAR SUSPENSION DESIGNS IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING

I.A. Danilov, A.A. Ivanov, S.A. Voinash

The modular suspensions on the market for passenger and agricultural trailers are analyzed. The analysis made it possible to identify the advantages and disadvantages of each type of suspension. An assessment of the advantages and disadvantages made it possible to propose a new type of modular torsion bar suspension with the ability to adapt to any vehicle. The modular torsion bar suspension is a stacked torsion bar. This module can be installed on passenger and agricultural trailers to reduce the loading height, lower the center of gravity and increase the stability of the trailer on the road.

Key words: suspension, modular suspension, modular torsion bar suspension.

Danilov Ivan Andreevich, postgraduate, ivan_danilov2022@bk.ru, Russia, Tver, Tver State Agricultural Academy,

Ivanov Alexander Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, aivanov@tvgsha.ru, Russia, Tver, Tver State Agricultural Academy,

Voinash Sergey Aleksandrovich, junior researcher, sergey_voi@mail.ru, Russia, Rubtsovsk, Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

УДК 629.046
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-485-486

ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ АКТИВНЫХ ПОДВЕСОК СИДЕНИЙ НА МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ

И.А. Викторов, А.А. Иванов, С.А. Войнаш

Рассмотрены типы подвесок сидений транспортно-технологических машин, существующих на рынке. Изучен конструктив основных представителей в сфере производства сидений, фирмы Grammer и VRS® «Sears». Приведена классификация подвесок по типам демпфирующего элемента. Проведен патентный поиск, выявлены плюсы и минусы рассмотренных конструкций. Данная работа проведена с целью разработки наиболее оптимальной конструкции подвески сидения для мобильных средств, которая изменяет свои характеристики в зависимости от изменения поверхности движения, колебаний крюковой нагрузки и двигателя.

Ключевые слова: Подвеска сидения, торсион, пневмоподушка, рычаг, гидравлический амортизатор.

Анализ, проведенный экспертами Всероссийского научно-исследовательского института сельского хозяйства, показал, что доля транспортных работ, выполняемых ТТА, составляет 40-60% от общего объема перевозок. При этом увеличение рабочих скоростей движения сопровождается повышением вибрационного воздействия на оператора, что приводит к повышенной утомляемости и, как следствие, снижению производительности, качества выполняемой работы, возникновению опасных дорожных ситуаций. Таким образом, условия труда оператора в значительной мере влияют на производительность тракторно-транспортного агрегата.

Исходя из вышесказанного, одним из актуальных направлений совершенствования ТТА является повышение их производительности за счет снижения вредного воздействия транспортной вибрации и создания комфортных и безопасных условий труда оператора.

Современное водительское сиденье имеет две основных части – это посадочное место и подвеска сиденья. Среди всего многообразия моделей сидений на рынке по типу подвесок можно выделить два вида конструкций:

- с механическим подрессориванием;
- с пневматической подвеской [1].

До сих пор в качестве стандарта в области сидений с механическим подрессориванием используются устройства, в которых в качестве упругого элемента применяется пластинчатый торсион, соединяющий подвижные и неподвижные части механизма. Он работает в паре с обычным гидравлическим амортизатором.

Элементы торсионного типа подвески сиденья включают в себя:

- остов;
- жестко прикрепленную к остову горизонтальную подушку;
- вертикальную подушку (спинку), соединенную с боковыми кронштейнами остова через шарниры;

- рычажную подвеску, на которой опирается остов;
- пластинчатый торсион с муфтой закрутки и рукояткой;
- механизм регулировки положения сиденья в продольном направлении с рычагом и фиксатором;
- механизм регулировки высоты сиденья с фиксатором;
- гидравлический амортизатор, расположенный между спинкой и нижней частью подвески [2].

В производстве торсионный тип подвески сидений применяют следующие фирмы: Akkomsan & Star Seating Systems, EBLO Seating B.V., KAB SEATING, Arimis Plastic Seating Systems Industry & Trade Corp. [3].

Рычажная подвеска торсионного типа состоит из двух пар рычагов (по два с каждой стороны), в задней части соединённых через пластинчатый торсион. Закрутка торсиона определяет упругость механизма, причём данный параметр может изменяться под вес каждого конкретного водителя. Для этого предусмотрен механизм закрутки торсиона, который состоит из муфты и выведенного с правой стороны спинки сиденья (если смотреть на него сзади) рычага.

За подавление колебаний подвески отвечает гидравлический телескопический амортизатор, который устанавливается между спинкой сиденья и основанием подвески с помощью шарнира.

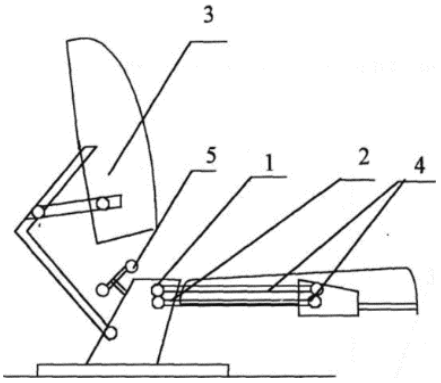


Рис. 1. Торсионная подвеска сиденья: 1 – верхний торсион; 2 – нижний торсион; 3 – подушка сиденья; 4 – направляющие рычаги; 5 – регулировочное устройство

В основе конструкции подвески находится салазочный механизм, который позволяет всей системе перемещаться вперёд и назад, подстраиваясь под индивидуальные параметры водителя. Управление этим механизмом осуществляется с помощью рычага, расположенного с левой стороны сиденья.

Также слева, под подушкой, есть рычаг, который регулирует наклон сиденья. А в задней части, под спинкой, находятся рычаги для настройки угла наклона спинки.

Кресло и подвеска устанавливаются на телескопическую стойку, в которой есть простой механизм регулировки высоты. Этот механизм может быть двух типов: обычный штифт или педаль, соединённая со штифтом.

В первом случае, чтобы поднять или опустить сиденье, нужно вынуть штифт, переместить кресло вверх или вниз и вставить штифт обратно в отверстие. Во втором случае нужно нажать на педаль, поднять или опустить кресло и отпустить педаль, когда достигнута желаемая высота. Схема торсионной подвески сиденья ТТМ представлена на рисунке 1.

Ключевые достоинства механической подвески – это её несложное устройство и доступная стоимость. Но в плане эффективности поглощения колебаний торсионы и пружины не могут сравниться с пневматической подвеской.

Основным недостатком пассивных систем подрессоривания считается невозможность обеспечивать допустимый уровень вибрационной защиты во всем диапазоне частот. Объясняется это возникновением низкочастотного резонанса, который затрудняет или делает невозможным управление ТТА при определенных режимах работы, что приводит к снижению производительности.

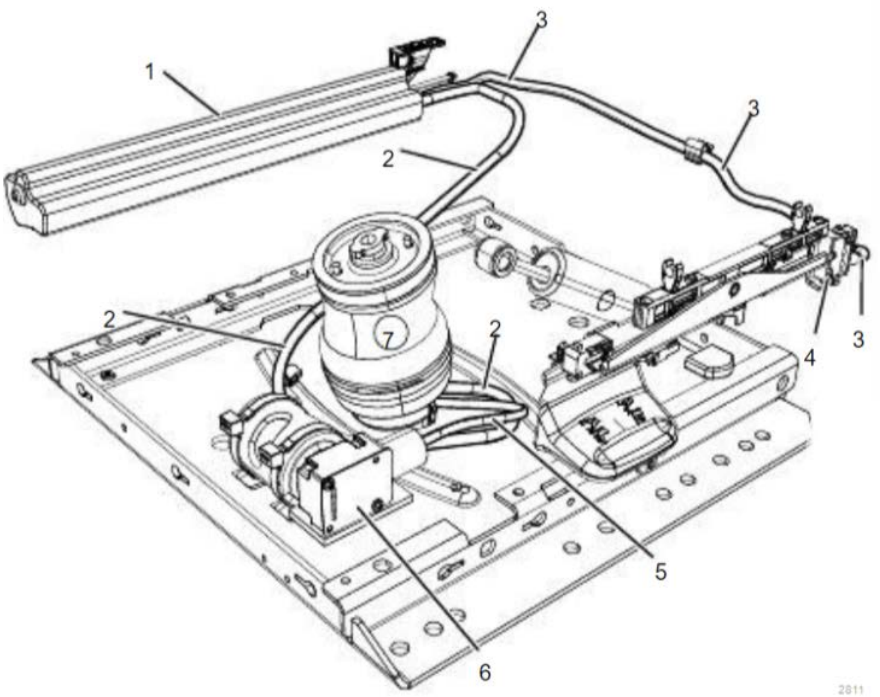


Рис. 2. Устройство пневматической подвески сиденья фирмы Grammer: 1 – дополнительная подача воздуха, 2 – шланг для подачи сжатого воздуха к пневморессоре, 3 – шланг для подачи сжатого воздуха к клапану регулировки высоты, 4 – клапан регулировки высоты, 5 – шланг для подачи сжатого воздуха от компрессора к пневморессоре, 6 – компрессор; 7 – пневморессора

Современные сиденья оснащены диафрагменными пневморессорами, состоящими из резиновой мембраны с тканевым каркасом, фланцевой пластины и пластикового поршня [4]. Компактность этих упругих элементов является ключевым фактором, поэтому они часто устанавливаются отдельно от амортизаторов. Как и другие пневматические элементы

в автомобильной технике, эти пневморессоры представляют собой сложные и наукоемкие компоненты, разработкой и производством которых занимаются ведущие компании. Contitech и Phoenix являются одними из лидеров в этой области.

Contitech известна как первопроходец в использовании пневматики в автомобильных подвесках [5]. Их линейка рукавных пневмобаллонов для сидений включает более 30 различных моделей с диаметрами от 80 до 200 мм, грузоподъемностью от 1 до 20 кН и ходом рессоры до 180 мм. Продукция Contitech пользуется спросом у таких крупных компаний, как Isringhausen, Be-Ge и Grammer (рис.2).

В современных конструкциях упругость пневмобаллона регулируется с помощью миниатюрного телескопического клапана, который связан с верхней частью сиденья через тяги и рычаги. Этот клапан не только позволяет выставить высоту сиденья, но и настроить жесткость в зависимости от веса водителя. Давление в упругом элементе может варьироваться от 3 до 7 бар.

Рядом с клавишей регулировки часто находится кнопка стравливания воздуха, которая позволяет быстро опустить сиденье в нижнее положение. Это особенно полезно в транспортных средствах с ограниченным рабочим пространством водителя, где посадка может быть затруднена.

Раньше для установки пневматических упругих элементов в подвеску сиденья требовалось наличие штатного компрессора в автомобиле. Однако теперь это не является проблемой благодаря автономным решениям. Некоторые сиденья европейского производства уже оснащены собственным электрическим компрессором, который питается от бортовой сети напряжением 12 или 24 В.

Фирмой «John Deere» используются конструкции полуактивной подвески сиденья с регулируемым демпфированием на основе магнитореологической жидкости, разработанные компанией «Sears» [6].

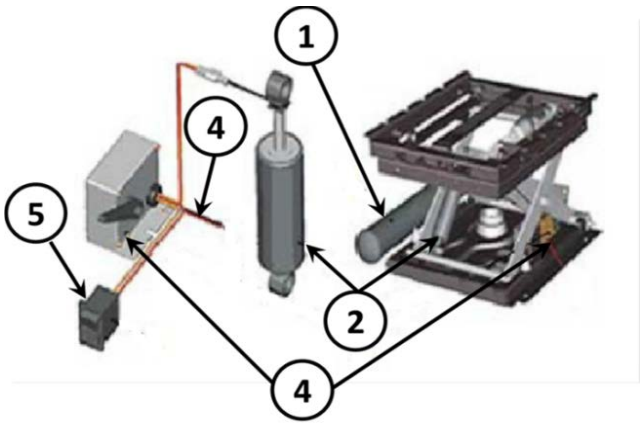


Рис. 3. Полуактивная подвеска сиденья VRS® фирмы «Sears»: 1 – ресивер со сжатым воздухом; 2 – магнитореологический амортизатор; 3 – датчик положения подвески сиденья и ЭБУ; 4 – источник питания; 5 – тумблер управления для выбора жесткости подвески сиденья

Работает данная подвеска следующим образом. При движении ТТА датчик положения связан с ЭБУ, который передает электрический сигнал на электромагнитную катушку демпфера 2, что приводит к изменению демпфирующих качеств амортизатора 2. Баллон 1 сжатого воздуха служит для накопления и подачи сжатого воздуха в полость рессоры подвески, которая обеспечивает частоту собственных колебаний 0,50-0,75 Гц. Сложным узлом в этой конструкции является магнитореологический демпфер. Результаты исследований систем подрессоривания показали, что максимальное количество внешней потребляемой энергии приходится полностью на активные подвески (более 10 000 Вт), а минимум потребления энергии приходится – на адаптивные и полуактивные подвески (10–20 Вт).

Рассмотренные ранее конструкции систем подрессоривания работают по принципу накопления энергии колебаний через упругий элемент и рассеивание данной энергии через демпфирующий элемент. Отличительной особенностью активной системы подрессоривания является то, что для ее работы необходим ввод внешней энергии, которая расходуется на исполнительное устройство, расположенное между подрессоренной и неподрессоренной массой, что позволяет полностью управлять амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) данной подвески, которая будет формироваться за счет работы ЭБУ с обратной связью по разработанному для конкретной системы алгоритму.

На рисунке 4 представлена подвеска сиденья транспортного средства (патент 186837) [7] , включающая гидроцилиндр с установленным в нем поршнем со штоком, сообщенным с гидропневматическим аккумулятором, ресивер, регулируемый дроссель, датчик перемещения сиденья, датчик вибрации сиденья, отличающаяся тем, что она дополнительно снабжена датчиком виброускорений моста, установленным на мосту под кабиной транспортного средства, при этом пневматическая полость гидропневматического аккумулятора имеет нагнетательный клапан и клапан сброса давления и связана с ресивером, а регулируемый дроссель связан с электронным блоком управления, который взаимодействует с датчиком виброускорений сидения, датчиком перемещения сидения, датчиком вибрации моста, нагнетательным клапаном и клапаном сброса давления.

Подвеска сиденья транспортного средства состоит из сиденья 1 гидроцилиндра 2 с установленным в нем поршнем 3 со штоком 4. Основание подвески сиденья 5 связано с гидроцилиндром 2, который посредством штока 4 жестко связан с каркасом сиденья 1. Гидроцилиндр имеет две полости 6 и 7, расположенные по обе стороны поршня, при этом полость 7 посредством магистрали 8 соединена с регулируемым дросселем 10. Полости 6 и 7 сообщаются между собой соответственно посредством магистрали 8 и 9, которые соединены с регулируемым дросселем 10. При этом полость гидроцилиндра 6 через магистраль 9 подключена к пневмогидравлическому аккумулятору 11, который содержит гидравлическую 12 и пневматическую полость 13. Полости 6 и 7 гидроцилиндра и полость 12 пневмогидравлического аккумулятора 11 заполнены рабочей жидкостью. Пневматическая

полость 13 заполнена газом под давлением и при помощи нагнетательного клапана 14 сообщена с ресивером 15, а также имеет клапан сброса давления 16. Регулируемый дроссель 10 и клапаны 14 и 16 имеют электронное управление, включающее электронный блок управления 17, датчик перемещения сиденья 18, датчик виброускорений моста 19 и датчик виброускорений сиденья 20.

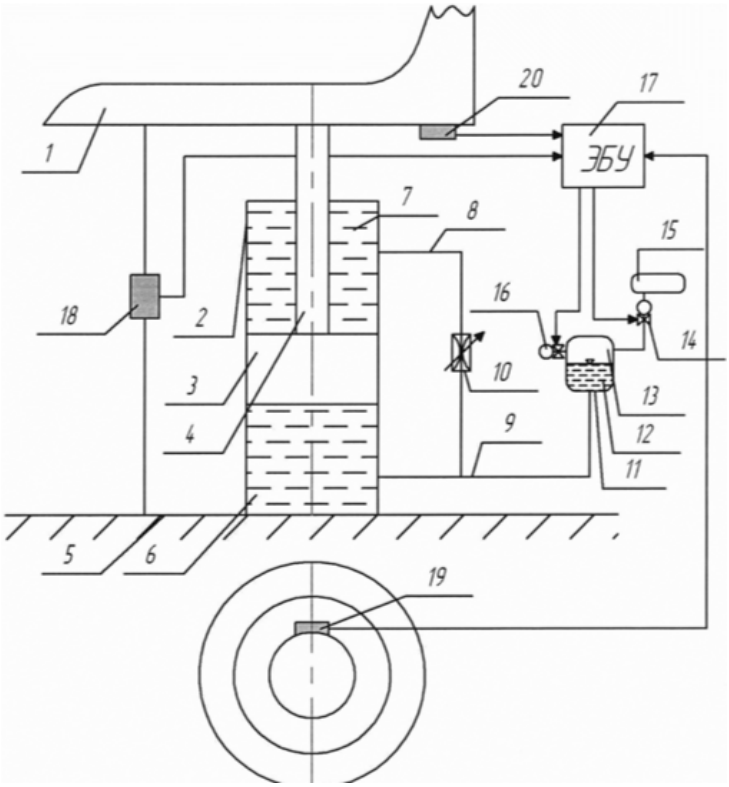


Рис. 4. Адаптивная подвеска сиденья транспортного средства: 1 – подушка сиденья; 2 – гидроцилиндр; 3 – поршень; 4 – шток; 5 – основание; 6 – подпоршневая полость; 7 – надпоршневая полость; 8, 9 – гидромагистрали; 10 – дроссель; 11 – пневмогидравлический аккумулятор (ПГА); 12 – гидравлическая полость ПГА; 13 – пневматическая полость ПГА; 14,16 – пневматические клапаны; 15 – ресивер; 17 – ЭБУ; 18 – датчик положения сиденья; 19, 20 – датчики вибрации

Недостатком данной конструкции подвески является ограниченный динамический диапазон регулирования упругих свойств одним гидропневматическим аккумулятором. Это приводит к снижению эксплуатационных возможностей транспортного средства при переезде препятствий, сложных рельефах и при возникновении резонансных колебаний.

Так же было рассмотрено сидение с ножничным типом направляющего устройства (патент №2281864) [8].

Изобретение относится к конструкции сидений, в частности к устройствам для виброизоляции сидений операторов самоходной сельскохозяйственной техники (рис.5). Сиденье оператора самоходной техники содержит основание, каркас с подушкой и спинкой, связанные между собой

посредством направляющего устройства типа «ножницы», и амортизирующее устройство, шарнирно связанное посредством кронштейна с каркасом. Амортизирующее устройство содержит маятниковый подвес, выполненный в виде резьбового стержня со сферическим профилем на одном из его концов и резьбовой втулки, соединенной с ним, также имеющей сферический профиль. Оба сферических профиля маятникового подвеса взаимодействуют с коническими поверхностями соответственно нижних и верхних пластин. Упругий элемент выполнен в виде пакета последовательно соединенных тарельчатых упругих элементов, которые связаны по внутреннему диаметру с внешней поверхностью втулки, одним концом жестко закрепленной на основании, а другим – входящим по скользящей посадке в направляющую втулку. Технический результат – повышение эффективности виброизоляции в горизонтальном направлении, упрощение конструкции и повышение эксплуатационных свойств.

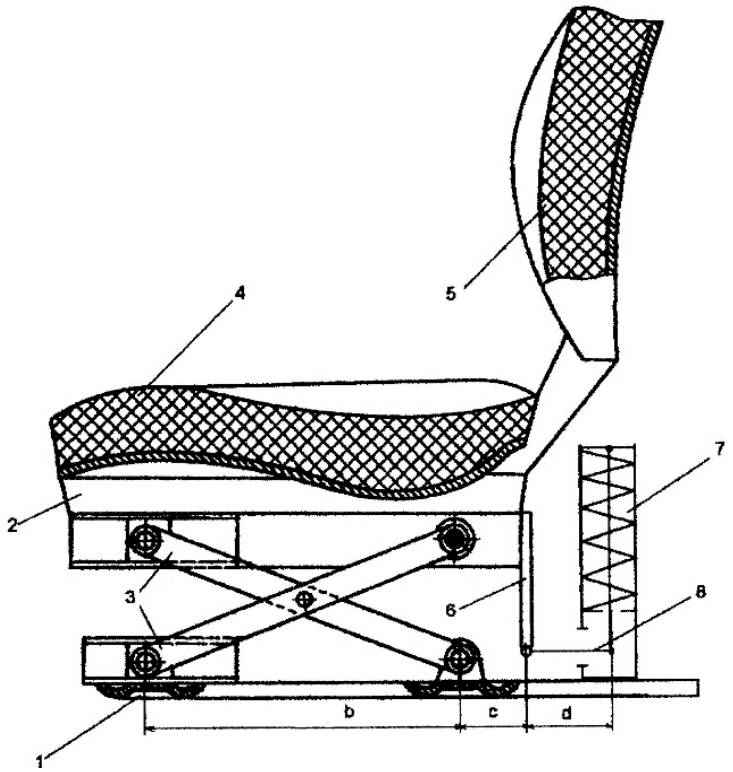


Рис. 5. Общий вид сидения оператора самоходной техники: 1 – основание; 2 – каркас; 3 – направляющее устройство, выполненное по тину "ножниц"; 4 – подушка; 5 – спинка; 6 – кронштейн; 7 – амортизирующее устройство; 8 – опорная плита

Сиденье оператора самоходной техники, содержащее основание, каркас с подушкой и спинкой, связанные между собой посредством направляющего устройства типа "ножницы", и амортизирующее устройство, шарнирно связанное посредством кронштейна с каркасом, отличающееся тем, что амортизирующее устройство содержит маятниковый подвес, выполненный в виде резьбового стержня со сферическим профилем на одном из его концов и резьбовой втулки, соединенной с ним, также имеющей

сферический профиль, причем оба сферических профиля маятникового подвеса взаимодействуют с коническими поверхностями соответственно нижних и верхних пластин, а упругий элемент выполнен в виде пакета последовательно соединенных тарельчатых упругих элементов, которые связаны по внутреннему диаметру с внешней поверхностью втулки, одним концом жестко закрепленной на основании, а другим - входящей по скользящей посадке в направляющую втулку.

Недостатками известного устройства являются: сравнительно невысокие виброизоляционные свойства в горизонтальном направлении, а также сложность обслуживания амортизирующего устройства.

Несмотря на значительное количество разработанных виброзащитных систем, на сегодняшний день широкое применение получили пассивные системы виброзащиты. Данные системы обладают простой конструкцией, надежны и долговечны в эксплуатации. Однако они не удовлетворяют требованиям по вибрационной защите оператора, особенно в МЭС, выполняющих свои задачи в сельском хозяйстве на повышенных скоростях движения, где применение пассивных систем ограничено и практически достигло своего предела, а в некоторых случаях эти системы уже не справляются с поставленными задачами.

Таким образом, анализ вышеперечисленных работ показал, что промежуточным вариантом по эффективности виброзащиты оператора на повышенных скоростях движения является использование адаптивных и полуактивных систем. Результаты исследований данных систем показали хорошую эффективность снижения вибрационной нагруженности. Однако в таких подвесках недостаточно проработан вопрос выбора рациональной характеристики и системы управления упругодемпфирующими свойствами. При этом применение полуактивных систем с магнитореологическими амортизаторами пока не находит широкого применения из-за высокой сложности как самой конструкции, так и системы управления.

Активные виброзащитные системы по-прежнему остаются перспективным направлением, однако основным фактором, сдерживающим их широкое применение, является высокое энергопотребление, сложность конструкции и высокая стоимость [9].

Учитывая вышеизложенные аргументы, совершенствование подвески оператора за счет выбора рациональной характеристики и управления ее упругодемпфирующими свойствами при движении на повышенных скоростях ТТА, является актуальной проблемой.

Список литературы

1. Авто альянс. [Электронный ресурс] URL: https://www.autoopt.ru/articles/products/9147787 (дата обращения: 04.10.24).

2. 5 колесо. [Электронный ресурс] URL: https://5koleso.ru/articles/garazh/pnevmopodveski_sidenii_chem_myagche (дата обращения: 04.10.24).

3. ПОВ 57. [Электронный ресурс] URL: https://pov57.ru/osnovnye-primenyaemye-v-avtomobile-tipy-sidenii-kak-ustroeny-sovremennye.html (дата обращения: 08.10.24).

4. Бринмакс. [Электронный ресурс] URL: https://brinmax.ru/1982/12/11/proizvodstvo-sidenij-avtomobilnyh-proizvoditeli-sidenya avtomobilya-iz-rossii (дата обращения: 04.12.24).

5. Manuals lib: сайт [Электронный ресурс] URL https://www.manualslib.com/manual/3211433/Grammer-Msg97gl.html (дата обращения: 09.12.24).

6. Sears Seating. Инновации. Система снижения вибраций VRS® [Электронный ресурс] URL: http://www.searsseating.net/russian/innovation4.html (дата обращения: 09.12.24).

7. Патент на полезную модель РФ № 186837. Подвеска сиденья транспортного средства / Поливаев О.И., Горбулич А.Н., Кузнецов А.Н., Лощенко А.В.; патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. № 2018106154; заявл. 19.02.2018; опубл. 05.02.2019. Бюл. № 4. 6 с.

8. Патент на изобретение РФ № 2281864. Сиденье оператора самоходной техники / Кочетов О.С., Кочетова М.О., Ходакова Т.Д.; патентообладатель Кочетов О.С. № 2005106054/11; заявл. 04.03.2005; опубл. 20.08.2006. Бюл. № 23. 5 с.

9. Патент на изобретение РФ № 2382254. Виброизолятор / Белозерова Е.Б., Фоминова О.В., Чернышев В.И.; патентообладатель ГОУ ВПО Орловский государственный технический университет. № 2008148786/11; заявл. 10.12.2008; опубл. 20.02.2010. Бюл. № 5. 6 с.

Викторов Илья Алиевич, аспирант, ilia.victorov2016@yandex.ru, Россия, Тверь, Тверская государственная сельскохозяйственная академия,

Иванов Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, aivanov@tvgsha.ru, Россия, Тверь, Тверская государственная сельскохозяйственная академия,

Войнаш Сергей Александрович, младший научный сотрудник, sergey_voi@mail.ru, Россия, Рубцовск, Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

REVIEW OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR ACTIVE SEAT SUSPENSIONS ON MOBILE POWER VEHICLES

I.A. Viktorov, A.A. Ivanov, S.A. Voinash

The article considers the types of seat suspensions for transport and technological vehicles that exist on the market. The design of the main representatives in the field of seat production, Grammer and VRS® «Sears» is studied. The classification of suspensions by types of damping element is given. A patent search was conducted, the pros and cons of the considered designs were identified. This work was carried out with the aim of developing the most optimal design of seat suspension for mobile vehicles, which changes its characteristics depending on changes in the surface of movement, fluctuations in the hook load and engine.

Key words: Seat suspension, torsion bar, air cushion, lever, hydraulic shock absorber.

Viktorov Ilya Alievich, postgraduate, ilia.victorov2016@yandex.ru, Russia, Tver, Tver State Agricultural Academy,

Ivanov Alexander Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, aivanov@tvgsha.ru, Russia, Tver, Tver State Agricultural Academy,

Voinash Sergey Aleksandrovich, junior researcher, sergey_voi@mail.ru, Russia, Rubtsovsk, Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

УДК 621.644.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-494-495

МОНТАЖ И ДЕМОНТАЖ ГИБКИХ ЭЛАСТИЧНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БЫСТРОРАЗЪЕМНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ

С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, И.И. Полупан

Представлена конструкция быстроразъемного соединения для монтажа и демонтажа отдельных звеньев труб с фланцами в длинномерные гибкие эластичные трубопроводы, что позволяет производить герметичное соединение трубопроводов без использования каких-либо прокладок и снизить трудоемкость и время монтажа соединения.

Ключевые слова: гибкая эластичная труба, фланец, резинотканевый материал, металлические закладки, соединение, трубопровод.

Гибкие эластичные трубопроводы могут быть использованы в различных отраслях техники для транспортирования жидкостей и газов, а также грунта при проведении дноуглубительных работ, подводной разработке траншей, гидронамыве промышленных площадок.

В эксплуатации применяют трубопроводы, включающие жесткие металлические трубы и расположенные на них поворотные (вращающиеся) стандартные стальные фланцы [1…5].

Недостатком является сложность монтажных работ связанная с установкой дополнительных эластичных прокладок, так как трубы и фланцы изготовлены из металлических материалов, и стыки соединения требуют их герметизации, кроме того, вращающиеся, свободно находящиеся на трубах фланцы, при наличии зазоров между внутренними диаметрами фланцев и внешними диаметрами труб, могут смещаться за счет этих зазоров в диаметрально противоположные стороны относительно друг друга, не обеспечивая соосность отверстий под болты в соседних фланцах и,следовательно, невозможность соединения труб.

Нами разработана конструкция эластичного тубопровода с вращающимися фланцами, содержащая гибкие эластичные трубы с концевыми участками в виде резинотканевых буртов с металлическими закладными элементами и расположенные на трубах вращающиеся стальные фланцы,

стягиваемые болтовыми соединениями, при этом стыкуемые трубы не нуждаются в каких-либо дополнительных герметизирующих прокладках. [6]. Недостатками трубопровода являются сложность монтажных работ, связанных с тем, что вращающиеся стальные фланцы расположены на трубах с большими зазорами, это может привести к смещению соседних фланцев в диаметрально противоположных направлениях, так как отсутствует возможность их центровки на трубах, и не будет обеспечена сооосность отверстий под болты, а, следовательно, невозможно стягивание фланцев болтовыми соединениями. Также недостаточна надежность, так как при стягивании фланцев болтовыми соединениями происходит неконтролируемое сжатие резинотканевых буртов и выпучивание их цилиндрических поверхностей, что приводит к большим деформациям и преждевременному разрушению резинотканевых материалов.

Указанные недостатки по упрощению монтажа и повышению надежности трубопровода устранены тем, что на буртах со стороны стыкуемых плоскостей выполнены фаски а в торцах фланцев концентрично их внутренним диаметрам проточены цилиндрические гнезда на глубину, равную длине цилиндрических поверхностей буртов, обеспечивающими возможность свободного размещения буртов в гнездах фланцев [7].

Разработаны быстроразъемные соединения трубопроводов, например, быстроразъемное соединение трубопроводов, содержащее многогранные фланцы со средством уплотнения в виде упругой изолирующей прокладки, размещенной в кольцевых выточках в торцах фланцев, пазы во фланцах выполнены в форме трапеций, а стяжной силовой элемент выполнен в виде вкладыша, имеющего форму сдвоенного ласточкина хвоста [8].

Недостатками являются сложность монтажных работ, связанная с установкой между двумя фланцами изолирующей прокладки и с размещением стяжных элементов-вкладышей в трапециевидных пазах, сложность конструкции и технологии изготовления соединения из-за необходимости размещения кольцевых выточек в торцах фланцев, а также в выполнении фланцев многогранными, пазов трапециевидными и вкладышей в форме сдвоенного ласточкина хвоста.

Также известно быстроразъемное соединение с коническими фланцами, содержащее эластичный элемент, два шарнирно связанных полухомута с внутренней полостью в форме кольцевой конической проточки, контактирующей своими стенками с конусными поверхностями фланцев при соединении полухомутов механизмом зажима, соединение снабжено закладным элементом в виде цетрирующей втулки, на ее наружной поверхности выполнена кольцевая канавка дугообразной формы, в которой размещен эластичный элемент, на торцах фланцев выполнены кольцевые цилиндрические проточки, в которых установлена центрирующая втулка, и конусные фаски, образующие полость для эластичного элемента [9].

Недостатками являются:

1. Необходимость наличия эластичного уплотнительного элемента, так как трубы и фланцы изготовлены металлическими и стыки соединения

требуют герметизации.

2. Большие трудоемкость и время монтажа соединения, связанные с установкой эластичного элемента в кольцевую проточку центрирующей втулки и размещением втулки с уплотнением в кольцевых проточках обоих конических фланцев.

3. Сложность конструкции соединения из-за наличия кольцевой канавки дугообразной формы на наружной поверхности центрирующей втулки, а также цилиндрических проточек и конических фасок на торцах конических фланцев.

4. Технологическая сложность изготовления полухомутов с внутренней полостью в форме кольцевой конической проточки, контактирующей своими стенками с конусными поверхностями фланцев при соединении полухомутов механизмом зажима, кроме того, для каждого типоразмера соединяемых труб требуется выполнение новой кольцевой конической проточки полухомутов, соответствующей внешним диаметрам конических фланцев.

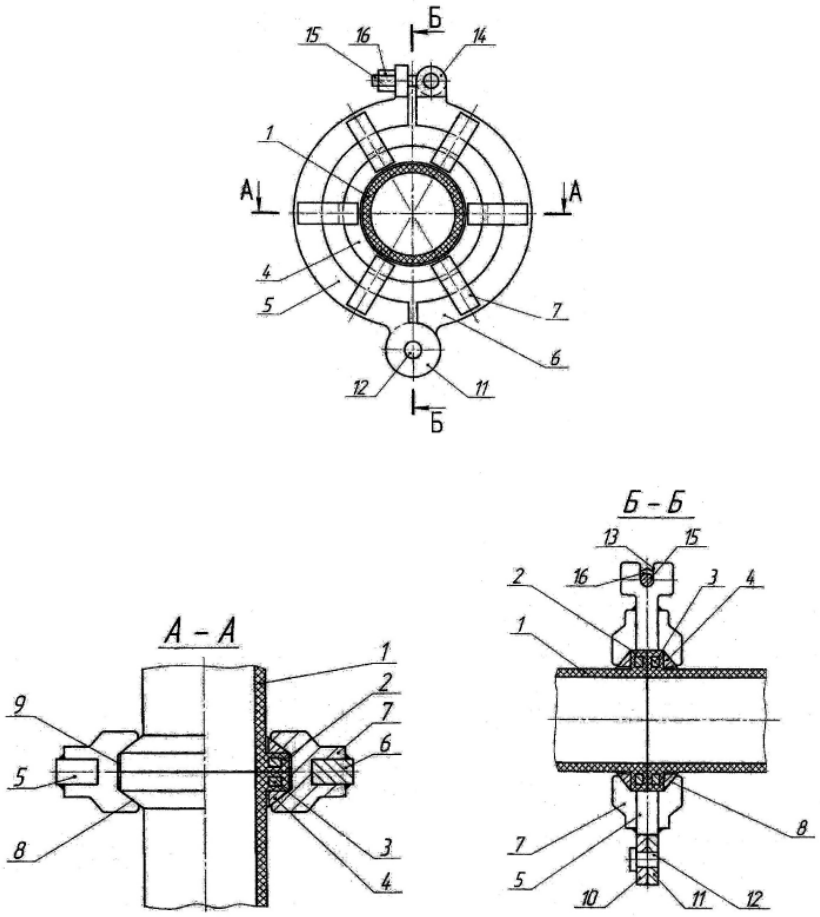
5. Наличие конических неподвижных фланцев не позволяет в случае необходимости использовать обычное соединение труб со стандартными вращающимися фланцами.

Технической задачей предложенной конструкции является снижение трудоемкости и времени монтажа, упрощение конструкции и технологии изготовления соединения.

Технический результат по снижению трудоемкости и времени монтажа, упрощению конструкции и технологии изготовления соединения достигается тем, что в быстроразъемном соединении гибких эластичных трубопроводов, содержащим трубы с фланцами, два шарнирно связанных полухомута с механизмом зажима, соединяемые трубы с фланцами, изготовлены гибкими эластичными из резинотканевых материалов, при этом фланцы сформированы в виде цилиндрических буртов с металлическими закладными, по концам труб в упор с буртами размещены подвижные прижимные конусные кольца, полухомуты выполнены в виде двух частей разрезного кольца с жестко фиксированными на нем и равномерно расположенными по его диаметру скобами, имеющими пазы, размещенные симметрично относительно осей симметрии скоб и выполненные в форме равнобедренных трапеций с большими основаниями с внешних сторон скоб и конусностью боковых сторон, равной конусности прижимных колец, причем все скобы установлены с возможностью при зажиме частей разрезного кольца охвата боковыми сторонами пазов конусных поверхностей соседних прижимных колец, а также с зазорами между меньшими основаниями трапеций и цилиндрическими поверхностями стыкуемых буртов [10].

На рисунке показано быстроразъемное соединение гибких эластичных трубопроводов, поперечный разрез эластичной трубы и разрезы А-А, Б-Б. Быстроразъемное соединение гибких эластичных трубопроводов содержит соединяемые гибкие эластичные трубы 1 с цилиндрическими буртами 2, изготовленные из резинотканевых материалов и с

металлическими закладными 3 в буртах, две шарнирно связанных между собой части разрезного кольца и механизм их зажима. По концам труб 1 в упор с буртами 2 размещены подвижные прижимные конусные кольца 4. На частях 5 и 6 разрезного кольца жестко зафиксированы и равномерно расположены по его диаметру скобы 7, имеющие пазы, размещенные симметрично относительно осей симметрии скоб 7 и выполненные в форме равнобедренных трапеций с большими основаниями с внешних сторон скоб и конусностью боковых сторон 8, равной конусности прижимных колец 4.



Быстроразъемное соединение гибких эластичных трубопроводов: 1 – трубы эластичные; 2 – бурты; 3 – металлические закладные; 4 – кольца; 5, 6 – части разрезного кольца; 7, 8 – скоба; 9 – основания трапеции; 10, 11 – ушки; 12 – штифт; 13 – паз; 14 – проушины; 15 – болт; 16 - гайка

Скобы 7 установлены с возможностью при зажиме частей 5 и 6 разрезного кольца охвата боковыми сторонами 8 пазов конусных поверхностей прижимных колец 4 и с зазорами между меньшими основаниями 9 трапеций и цилиндрическими поверхностями стыкуемых буртов 2. Части 5 и 6 разрезного кольца соединены между собой шарниром, включающим ушки 10 и 11, через которые проходит цилиндрический ступенчатый

штифт 12. Механизм зажима расположен на вершинах частей 5 и 6 разрезного кольца и состоит из паза 13 и проушины 14, через которые проходит откидной болт 15, снабженный несъемной гайкой 16.

Подвижность прижимных конусных колец 4 по эластичным трубам 1 обеспечена за счет выполнения сопрягаемых поверхностей с зазорами. При обычных не быстроразъемных соединениях возможно вместо подвижных прижимных конусных колец 4 размещение на эластичных трубах 1 стандартных вращающихся металлических фланцев, расположенных в упор к буртам 2 с металлическими закладными 3, с последующей стяжкой фланцев болтовыми соединениями.

На ступени меньшего диаметра штифта 12 жестко закреплено, например, запрессовкой ушко 11 и с зазором посажено ушко 10, что создает подвижную кинематическую пару вращения частей 5 и 6 разрезного кольца, а ступень большего диаметра штифта 12 обеспечивает неразъемность ушек 10 и 11.

Жесткое фиксирование скоб 7 на частях 5 и 6 разрезного кольца осуществлено, например, сваркой. Число равномерно расположенных по диаметру разрезного кольца скоб 7 определяют в зависимости от диаметров соединяемых эластичных труб 1 и давления транспортируемых жидкостей и газов из условия обеспечения герметичности стыкуемых буртов 2. Величина зазоров между меньшими основаниями 9 пазов скоб 7 и цилиндрическими поверхностями стыкуемых буртов 2 зависит от требуемых усилий стыковки буртов 2, создаваемых боковыми сторонами 8 трапеций скоб 7 через подвижные прижимные конусные кольца 4 при зажиме частей 5 и 6 разрезного кольца. Соединение гибких эластичных труб различных диаметров осуществляют одинаковыми скобами 7, при этом изменяют только размеры частей 5 и 6 разрезного кольца. Технология изготовления плоских скоб 7 с пазами в форме трапеций не вызывает сложностей.

Стыковку эластичных труб производят следующим образом. Сводят соединяемые гибкие эластичные трубы 1, добиваясь их соосности, до соприкосновения торцевых поверхностей цилиндрических буртов 2. Накидывают жёстко фиксированные на частях 5 и 6 разрезного кольца скобы 7 на конусные поверхности соседних прижимных колец 4 и поворачивают шарнирно связанные части 5 и 6 таким образом, чтобы все скобы 7 были равномерно расположены по диаметру разрезного кольца и охватывали боковыми сторонами 8 пазов конусные поверхности прижимных колец 4, а меньшие основания 9 трапеций составляли одинаковые зазоры с цилиндрическими поверхностями буртов 2.

Вращая откидной болт 15 в проушине 14, устанавливают его в пазе 13 и несъёмной гайкой 15 начинают стягивать части 5 и 6 разрезного кольца. Гайка 15 несъёмная, поэтому исключена её потеря при монтажных работах. Так как подвижные прижимные конусные кольца 4 размещены в упор с буртами 2 из резинотканевых материалов, то при затягивании частей 5 и 6 разрезного кольца откидным болтом 15 и гайкой 16 боковые стороны 8 пазов скоб 7 через конусные поверхности прижимных колец

4 вызывают перемещение последних в осевом направлении труб, что создаёт усилие сжатия торцевых поверхностей буртов 2 и выдавливание материала их цилиндрических поверхностей в зазоры между основаниями 9 трапеций и цилиндрическими поверхностями буртов 2.

Наибольшего усилия стягивания достигают при полном заполнении указанных зазоров материалами буртов 2, чем обеспечивают гарантируемую надёжность герметичности быстроразъёмного соединения, при этом отпадает необходимость использования каких-либо прокладок или эластичных уплотнительных элементов. Стяжку полуколец 5 и 6 возможно осуществить другими способами, например, гидравлическим домкратом с последующей фиксацией положения частей 5 и 6 разрезного кольца при достижении необходимого усилия зажима. Последовательно, тем же гидравлическим домкратом производят зажим следующих стыков трубопровода с фиксацией колец 5 и 6 разрезного кольца при достижении необходимого усилия зажима. Последовательно, тем же гидравлическим домкратом производят зажим следующих стыков трубопровода с фиксацией колец 5 и 6.

Демонтаж разъёмного соединения осуществляют в обратном порядке.

Несъёмной гайкой 16 ослабевают зажим частей 5 и 6 разрезного кольца, выводят откидной болт 15 из паза 13, поворотом полуколец 5 и 6 в шарнире освобождают скобы 7 от контакта с конусными поверхностями прижимных колец 4. Транспортируют эластичные труоы 1 в место новой дислокации. В случае стяжки полуколец 5 и 6 гидравлическим домкратом, для демонтажа трубопровода достаточно удалить фиксатор частей 5 и 6 разрезного кольца и произвести разъединение труб в том же порядке.

Оригинальностью предложенного быстроразъёмного соединения гибких эластичных трубопроводов является то, что соединяемые гибкие эластичные трубы 1 с цилиндрическими буртами 2 изготовлены из резинотканевых материалов с металлическими закладными 3 в буртах 2. По концам труб 1 в упор с буртами 2 размещены подвижные прижимные конусные кольца 4. На двух шарнирно связанных частях 5 и 6 разрезного кольца жестко фиксированы и равномерно расположены по его диаметру скобы 7, имеющие пазы, размещенные симметрично относительно осей симметрии скоб 7 и выполненные в форме равнобедренных трапеций с большими основаниями с внешних сторон скоб 7 и конусностью боковых сторон 8, равной конусности прижимных колец 4, причем все скобы 7 установлены с возможностью при зажиме частей 5 и 6 разрезного кольца охвата боковыми сторонами 8 пазов конусных поверхностей соседних прижимных колец 4, а так же с зазорами между меньшими основаниями 9 трапеций и цилиндрическими поверхностями стыкуемых буртов 2. Это позволяет:

1. Производить герметичное соединение трубопроводов без использования каких-либо прокладок или эластичных уплотнительных элементов, так как соединяемые гибкие эластичные трубы с

цилиндрическими буртами изготовлены из резинотканевых материалов.

2. Снизить трудоемкость и время монтажа соединения за счет обеспечения герметичности стыков непосредственным контактом торцевых поверхностей буртов.

3. Упростить конструкцию соединения из-за отсутствия проточек на торцах буртов.

4. Упростить технологию изготовления соединения, так как стыковку гибких эластичных труб различных диаметров осуществляют одинаковыми плоскими скобами с пазами в форме трапеций

5. Использовать при обычных не быстроразъемных соединениях вместо размещенных на эластичных трубах подвижных прижимных конусных колец стандартные вращающиеся металлические фланцы, расположенные в упор к буртам с последующей стяжкой фланцев болтовыми соединениями.

Таким образом, предложенное быстроразъемное соединение позволяет достичь технического результата по снижению трудоемкости и времени монтажа, упрощению конструкции и технологии изготовления соединения.

Список литературы

1. Зелепухин Н.П., РавинскийЛ.М., Харин А.И. Справочник гидромеханизатора. Киев: Будівельник, 1969. С. 90-91.

2. Е.З. Рабинович. Гидравлика. М.: Недра, 1980. 278 с.

3. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов В.В. и др. Гидравлика, гидроматериалы и гидроприводы. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.

4. Лепешкин А.В., Михайлин А.А. Гидравлические и пневматические системы. М.: ACADEMIA, 2005. 331 с.

5. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Под ред. Некрасова В.В. Минск, Вышейша школа, 1988. 325 с.

6. Чижов А.Е., Чижов Е.А., Новиков С.Г. Эластичные трубопроводы / Гидротехника. Спб. 2010. № 1. С. 56-59.

7. Патент РФ 2459130, МПК F16L11/08, F16L23/00. Эластичный трубопровод с вращающимися фланцами/ Новиков С.Г., Чижов М.Е., Чижов А.Е., Чижов Е.А., Волосухин В.В., Горбатенко С.А.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью фирма «Рассвет-К» (RU) # 2011108799/06/ Заявл. 09.03.2011. Опубл. 20.08.2012. Бюл. № 23.

8. Быстроразъемное соединение трубопроводов: а.с.1560879 СССР: МКИ F 162 33/02/ Б.В. Щукин (СССР). № 4376419/25-29; заявл.10.02.88; опубл. 30.04.90. Бюл. № 2.

9. Быстроразъемное соединение с коническими фланцами: а.с. 1645728 СССР: МКИ F16L37/00 / Н.К. Васильев, В.А. Бакунин, Ю.А. Доронин (СССР). № 4647748/29; заявл. 08.02.89; опубл. 30.04.91. Бюл. № 16.

10. Патент РФ 2516730, МПК F16L37/00. Быстроразъемное соединение гибких эластичных трубопроводов. Новиков С.Г., Чижов А.Е., Чижов Е.А., Трубников И.В.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью фирма «Рассвет-К» (RU). № 2010135187/06. Заявл. 23.08.2010. Опубл. 20.05.2014. Бюл. № 14.

Новиков Сергей Георгиевич, канд. техн. наук, доцент, novikov1950sergey@yandex.ru, Россия, Курск, Курский государственный аграрный университет имени И.И. Иванова,

Малыхин Виталий Викторович, канд. техн. наук, доцент, malykhin1946@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Полупан Иван Иванович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, ivan polupan@mail.ru, Россия, Курск,Курский государственный аграрный университет имени И.И. Иванова

INSTALLATION AND DISMANTLING OF FLEXIBLE ELASTIC PIPELINES WITH QUICK-DISCONNECTION CONNECTION

S.G. Novikov, V.V. Malykhin, I.I. Polupan

The design of a quick-disconnect connection for installation and dismantling of individual pipe sections with flanges in long flexible elastic pipelines is presented, which allows for a hermetic connection of pipelines without the use of any gaskets and reduces the labor intensity and installation time of the connection.

Key words: flexible elastic pipe, flange, rubber-fabric material, metal bookmarks, connection, pipeline.

Novikov Sergey Georgievich, candidate of technical sciences, docent, novikov1950sergey@yandex.ru, Russia, Kursk, Kursk State Agrarian University named after I.I. Ivanov,

Malykhin Vitaly Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, malykhin1946@mail.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Polupan Ivan Ivanovich, candidate of technical sciences, head of department, ivanpolupan@mail.ru, Russia, Kursk, Kursk State Agrarian University named after I.I. Ivanov

СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.791.4:621.783
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-502-503

ОЦЕНКА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МИКРОВЫСТУПОВ И РАЗВИТИЯ КОНТАКТА МЕЖДУ РАЗНОРОДНЫМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ ПРИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.В. Абрамов

Разработана методика исследования контактного взаимодействия между разнородными материалами при термодеформационном воздействии во времени. Построены кинетические кривые образования контакта, пластической деформации микровыступов, изменения высоты микровыступов, изменения контактных напряжений на микровыступах, изменения механических свойств на поверхности и глубине приконтактного объема микровыступов в интервале температур от комнатных до предплавильных и интервале давлений до и после пороговых значений. Рассмотрены формоизменение и характер смятия микровыступов, кинетика контактного взаимодействия между разнородными материалами с резко различной сопротивляемостью пластической деформации и природой химической связи при термодеформационном воздействии. Показано, что ответственным за образование контакта и активационные процессы на контактных поверхностях является пластическая деформация микровыступов, и, что уровень напряжений 2-го рода на контактных площадках микровыступов значительно превышает номинальные значения напряжений, заложенные в расчетные формулы.

Ключевые слова: методика исследования, контактное взаимодействие, характер смятия микровыступов, кинетика, действительный и физический контакт, пластическая деформация, сапфир, микронапряжения 2-го рода, выглаживание, схватывание.

Развитие науки и техники предъявляет повышенные требования к проектируемым машинам и оборудованию, приборам и аппаратам по геометрии деталей и узлов, прочности и надежности с сохранением исходных физико-механических и химических свойств при длительной эксплуатации, в т. ч. в экстремальных условиях и агрессивных средах. Это вызывает необходимость применения новых материалов или ранее известных, но в новых сочетаниях. В проектируемых конструкциях это вызывает необходимость получения прецизионного разъемного или неразъемного соединения последних в одноименном, разноименном или разнородном сочетании без изменения их исходных свойств.

Одним из путей решения этой проблемы является исследование контактного взаимодействия между материалами в твердой фазе при деформационном или термодеформационном воздействии и разработка на этой основе новых конструкторских решений и схем технологических процессов (ТП) получения высокочистых поверхностей и прецизионных соединений без изменения их исходных физико-механических свойств. В последние десятилетия особое место среди них занимают ТП, основанные на пластической деформации микровыступов контактных поверхностей (чистовая отделочная обработка плоских поверхностей выглаживанием синтетическими сверхтвердыми материалами, сварка давлением с нагревом, прессование и спекание ультрадисперсных порошков, получение высокочистых поверхностей металлов с регулируемыми свойствами и геометрией и т. д.). В этом случае обеспечивается эффективность ТП в части максимального сохранения исходного комплекса свойств материалов и регулирование степени прецизионности контакта. С одной стороны, прецизионность соединения предусматривает не только контроль и регулирование формоизменения и деформации микрорельефа в зоне контакта, но также проведение предварительной обработки контактных поверхностей материалов, в т. ч. методами, основанными на пластическом формоизменении поверхностей путем выглаживания натуральными и синтетическими сверхтвердыми материалами. С другой стороны, получение неразъемного прецизионного соединения требует знания кинетики и сущности процессов, протекающих на контактных поверхностях при термодеформационном воздействии на них. Это предполагает наличие прямых экспериментальных данных по кинетике развития отдельных стадий процесса, что, в свою очередь, позволяет разработать пути управления и регулирования ТП получения прецизионного соединения в целом.

В этой связи, проблему контактного взаимодействия при деформационном или термодеформационном воздействии, включающую в себя и образование соединения, целесообразно рассматривать в *двух аспектах*: 1) – установление кинетических закономерностей образования контакта между поверхностями за счет пластической деформации микровыступов обработки с учетом изменения механических и упругих свойств металла, геометрических характеристик поверхности и формоизменения микровыступов. Это позволяет решить вопрос прецизионности соединения; 2) – выяснение природы активации поверхности более твердого материала в контакте с более мягким металлом и установлении кинетических закономерностей развития схватывания (роста прочности) между ними. Это позволяет решить вопрос получения прецизионного неразъёмного соединения.

Рассмотрение проблемы контактного взаимодействия в указанных аспектах позволяет выйти на разработку новых ТП получения прецизионного разъемного и неразъемного соединения материалов в различном сочетании и, в т. ч., при температурах ниже $0{,}5T_{\text{пл}}$ металла с сохранение исходных физико-механических свойств и геометрии изделий.

Целью работы являлась разработка методики для установления влияния уровня термодеформационного воздействия на характер смятия и формоизменение микровыступов при формировании контакта, кинетику развития контакта за счет пластической деформации микровыступов, изменение механических свойств на поверхности контактных площадок и приконтактном объеме, а также определения и оценки уровня возникающих микронапряжений 2-го рода, компенсированных в объеме зерна микровыступа, в условиях чистовой отделочной обработки (выглаживания) и сварки давлением с нагревом разнородных материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации и природой химической связи и их роли в активации контактных поверхностей, т. е., первой и второй стадии твердофазной топохимической реакции.

Получение прецизионного соединения при контактном взаимодействии материалов под давлением с нагревом является результатом протекания ряда взаимосвязанных элементарных процессов и, согласно современным представлениям, протекает в три основные стадии [1-3]:

1) – образование действительного (физического) контакта;

2) – активация атомов соединяемых поверхностей, находящихся в состоянии физического контакта, и образование прочных химических (металлических) связей;

3) – релаксационная стадия (образование общих зерен, объемное взаимодействие, диффузионные процессы и др.).

В связи с одновременностью протекания этих процессов в пятнах микроскопического контакта, проведение технологических испытаний не позволяет дифференцированно оценить вклад каждой стадии в общую картину образования соединения. Для установления закономерностей развития каждой стадии процесса необходимо применение и разработка специальных методик и методов аналитического расчёта.

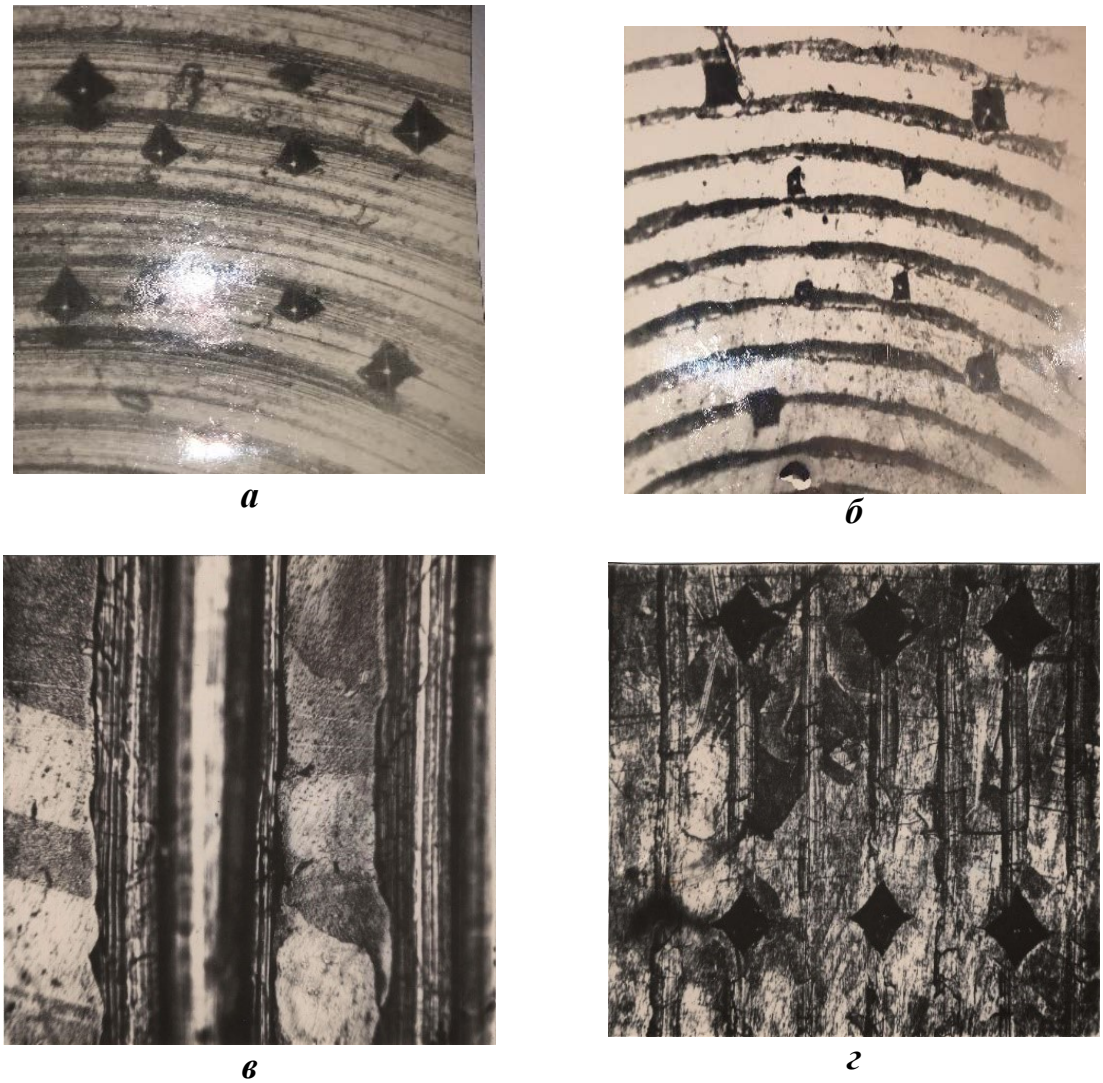
В ряде работ [4-9] и др., экспериментально исследованы особенности образования упругого, пластического и упруго-пластического контакта в зависимости от различных параметров. Однако работ, посвященных системному исследованию кинетики образования и развития действительного контакта и, при определенных условиях, переходящего в состояние физического контакта за счет пластической деформации микровыступов обрабатываемых (свариваемых) поверхностей, практически нет. Не установлены качественные и количественные кинетические закономерности смятия микровыступов в контакте, изменения механических свойств на поверхности контактных площадок и объеме микровыступов, не определены величины контактных напряжений в объеме микровыступов и кинетика их изменений и их основной роли в активации контактных поверхностей. Кроме того, наблюдается большое расхождение экспериментальных и прогнозируемых результатов, получаемых при решении известных уравнений для определения отдельных стадий процесса [3, 7, 10]. Общим недостатком этих уравнений является то, что в них заложены параметры объёмной ползучести, тогда как образование действительного и физического контакта

происходит за счет пластической деформации микровыступов обработки. Это сдерживалось отсутствием простой и объективной методики, позволяющей системно и с высокой точностью установить количественные и качественные закономерности образования контакта, пластической деформации микровыступов, их смятия и формоизменения непосредственно на контактных поверхностях в условиях сварки давлением с нагревом и чистовой отделочной обработке выглаживанием синтетическими сверхтвердыми материалами [11-13].

Экспериментальные исследования контактных поверхностей выполняли по методике профилографирования и фрактографии (оптической и электронной микроскопии) фиксированного участка [9, 14, 15]. Статистическая обработка изменения показателей шероховатости контактных поверхностей проводилась специальной компьютерной программой профилографа-профилометра мод. 201 с ИВК [15]; радиус иглы профилографа 2 мкм; вертикальное (ВУ) и горизонтальное (ГУ) увеличение находилось в пределах: от 1000 до 100 000 крат и от 200 до 4000 крат, соответственно и записывалось автоматически на электротермическую бумагу. Изменение механических свойств на поверхности контактных площадок и по глубине приконтактного объема микровыступов оценивали путем измерения микротвердости (Н) на приборе ПМТ–3 при нагрузке Р, равной 0,5 Н (50 гс). На исследуемой поверхности отпечатками алмазной пирамиды прибора ПМТ–3 отмечали фиксированный участок (рис. 1 а, б, в, г) до и после приложения нагрузки. С фиксированного участка снимали профилограммы до и после нагружения; контрольные замеры высоты и ширины основания микровыступов выполняли на двойном микроскопе МИС-11. Для наблюдения и настройки иглы профилографа применялась оптическая головка бинокулярная микроскопа МБС; фиксированный участок фотографировали после каждого нагружения через сапфир.

Исследования выполняли на парах: металл (медь МБ, никель НВК, сплав 50Н. алюминиевый сплав АД 1) – синтетический монокристаллический оптически прозрачный сапфир (корунд) 60^0-й ориентации к оси роста и обработкой рабочей поверхности R_z = 0,03 мкм. Выбор сапфира обусловлен тем, что он обладает исключительно благоприятным практически важным сочетанием комплекса свойств (высокие: твердость – 9 ед. по шкале Мооса, температура плавления, сопротивляемость ползучести, нулевое водопоглощение и др.), а также относительная дешевизна производства, обуславливают его широкое применение в технике как конструкционного материала [13-16]. В данной работе приведена часть экспериментальных результатов, полученные для пары (медь + сапфир, сплав 50 Н). Образцы меди после механической обработки подвергали отжигу в среде водорода при 650 ° С в течение 45 мин; контактные поверхности обрабатывали точением с R_z =3,2…6,3…10 мкм и строганием с R_z = 40…80 мкм.; длина образцов – 25 мм., диаметр – 12 мм.; опорные поверхности образцов шлифовали, непараллельность торцов не более 0,002 мм. Нагружение выполняли на установке для диффузионной сварки типа А306.08; степень разрежения состав-

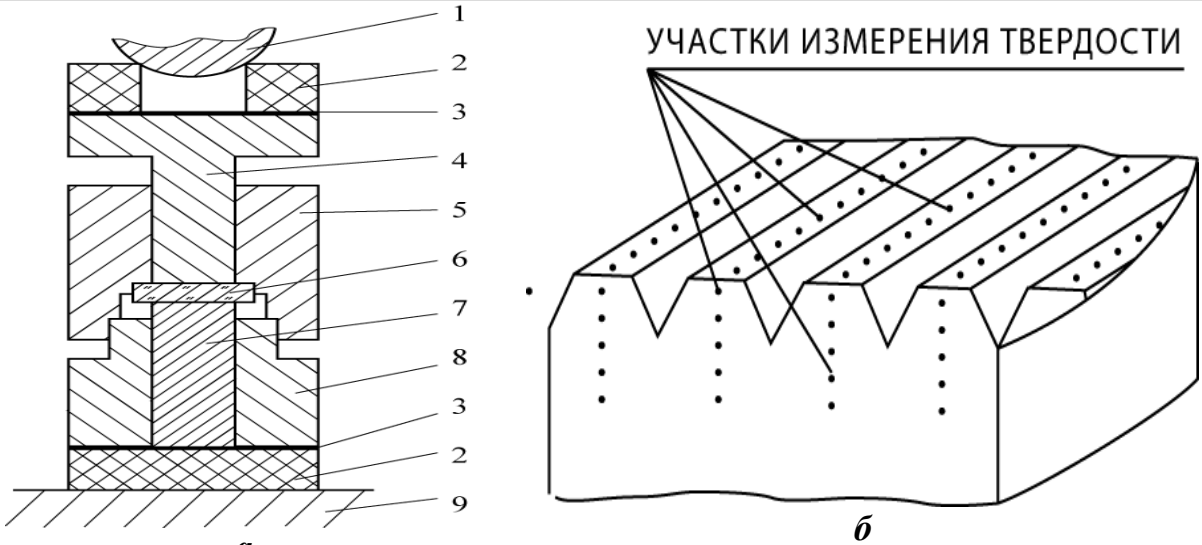
ляла (1…5)x10^{-5} мм. рт. ст. Температура определялась хромель-алюмелевой (ХА) термопарой и контролировалась прибором МПЩПр – 54.



а ***б*** ***в*** ***г***

Рис. 1. Фрактография контактной поверхности до (а) и после (б, в, г) нагружения; обработка поверхности (а, б) – точение, R_z = 3,2…6,3…10 мкм; увеличение х110; в, г -строгание, R_z = 40…80 мкм.; а, б,в – 1-я стадия смятия; г – 2-я стадия смятия

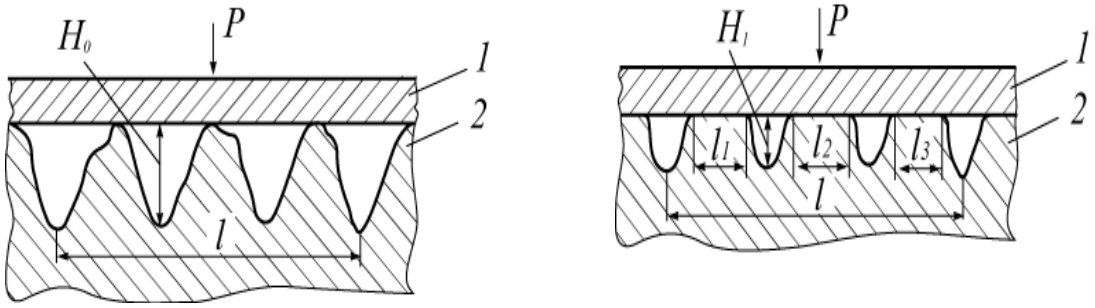
Нагружение контактной (свариваемой) поверхности выполняли следующим образом. Образец в приспособлении (рис. 2 а, б) помещали в камеру, где создавали вакуум и нагревали до температуры процесса; к контактной поверхности через сапфировый диск прикладывали внешнее (сварочное) давление (*P*); длительность воздействия изменялась от 10…15…30 с до нескольких десятков минут и определялась конкретными задачами процесса выглаживания или сварки. Т. о., схемы процессов обработки металлической поверхности плоским сапфировым диском и его сварки давлением с нагревом аналогичны, кроме некоторых особенностей технологии [11-13].



а *б*

Рис. 2. Схема приспособления для нагружения (а) и измерения микротвердости (б) на поверхности контактных площадок и глубину микровыступа; 1 – шар, 2 – керамическое кольцо, 3 – слюда, 4 – шток, 5 – обойма, 6 – сапфир, 7 – исследуемый образец, 8 – опорная обойма, 9 – опорное основание

После выдержки образцов в приспособлении при заданных (T) и (P), их охлаждали до комнатной температуры и с фиксированного участка вновь снимали профилограммы при неизменных (ВУ) и (ГУ) и фрактограммы. Путем сопоставления профилограмм и их автоматической обработки компьютерной программой ИВК по изменению высоты микровыступов (рис. 3, а, б) можно определить относительную величину пластической деформации последних, но только на 1-м и 2-м этапах смятия микровыступов, а также путем подсчета относительного значения длин (l_1, l_2, l_3, см. рис. 3) контактных площадок на выделенном фиксированном участке (L), определить относительную или абсолютную величину площади действительного контакта [15]. Скорость нагрева и охлаждения проводили с учетом различия их теплофизических свойств.



а *б*

Рис. 3. Схема измерения длин (l) на выделенном участке (L) на 1-м (а) и 2-м (в) этапах смятия микровыступов H_0 – исходная высота микровыступов, H_1 – высота в текущий момент времени, $l_{1,2,3}$ – ширина контактных площадок, мм; 1 – корунд, 2 – металл

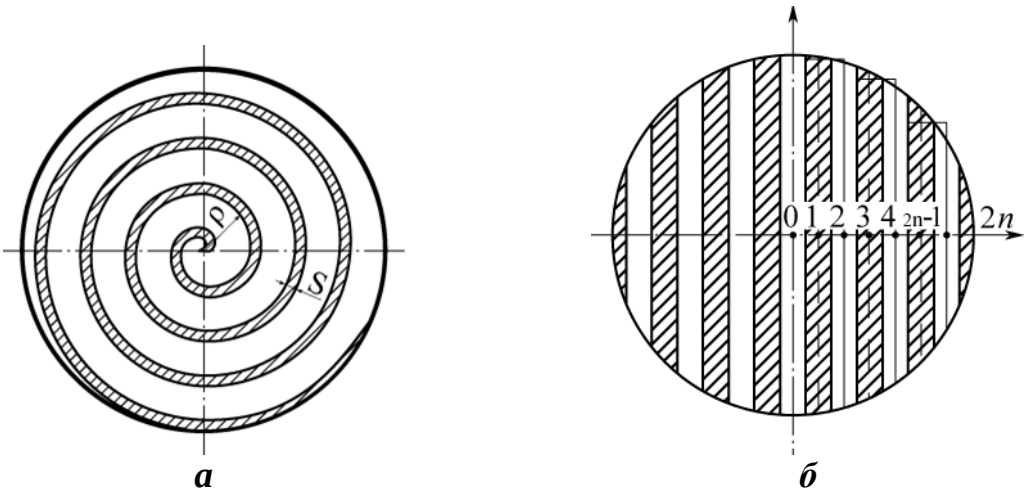
При механической обработке торцевой части цилиндрического образца на токарном и строгальном станках образуются микровыступы, часто треугольного профиля. В первом случае микровыступ представляет собой непрерывную кривую, так называемцю архимедову спираль (это кривая, описываемая точкой, движущейся с постоянной скоростью ω). Такая кривая в полярных координатах описывается следующим выражением:

$$\rho = \frac{\upsilon}{\omega} \cdot \varphi. \quad (1)$$

При точении резец движется с постоянной скоростью υ, а деталь вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = 2\pi \cdot n$, где n – число оборотов в единицу времени. Таким образом, описываемая резцом на поверхности образца линия, является аналогом архимедовой спирали. В процессе воздействия давления через сапфировый диск на микровыступы (в наших экспериментах треугольного сечения) послединие сминаются и общая площадь контакта увеличивается. Полагая, что в каждый произвольный момент времени ширина контактной площадки S постоянна для всей поверхности, можно вычислить полную площадь контакта. Поверхность контактной площадки (рис. 4, а) будет ограничена двумя архимедовыми спиралями, отстоящими друг от друга на расстоянии S и описываемыми уравнениями (2) и (3) в полярных координатах:

$$\rho_1(\varphi) = \frac{\upsilon}{\omega} \cdot \varphi - \frac{S\prime}{2}, \quad (2)$$

$$\rho_2(\varphi) = \frac{\upsilon}{\omega} \cdot \varphi + \frac{S\prime}{2}. \quad (3)$$



а ***б***

Рис. 4. Схемы расчета площади контакта F:
а – точение, б – строгание

Площадь, ограниченная этими кривыми, может быть выражена через двойной интеграл:

$$F = \int_0^{\Phi} \int_{\rho_1(\varphi)}^{\rho_2(\varphi)} \rho \, d\rho \, d\varphi, \quad (4)$$

где $\Phi = T \cdot \omega$; $T = \frac{R}{\upsilon}$ – время обработки контактной (свариваемой) поверхности точением. Проведя интегрирование, получим

$$F = \int_0^{\Phi} \int_{\rho_1(\varphi)}^{\rho_2(\varphi)} \rho \, d\rho \, d\varphi = \frac{\upsilon \cdot \omega \cdot T^2 \cdot S\prime}{2}. \quad (5)$$

Так как $R = T \cdot \upsilon$, $\omega = 2\pi \cdot n$ и $N = T \cdot n$ – число микровыступов, приходящихся на длину, равную радиусу образца, получим:

$$F = \pi \cdot N \cdot R \cdot S. \quad (6)$$

Обозначим через $\varepsilon = \frac{S\prime \cdot N}{R}$ относительную ширину контактных площадок ($0 < \varepsilon \leq 1$) и, подставляя в выражение (6), получим

$$F = \pi \cdot \varepsilon \cdot R^2 \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет, зная относительную ширину контактных площадок (определяется по кинетической кривой экспериментально, т. е. это значение снимается с экспериментального графика функциональной зависимости $E = f(T, P, R_z)$) и радиус образца, рассчитать площадь действительного (физического) контакта, образующегося при выглаживании плоской поверхности или сварке давлением с нагревом материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации.

Рассмотрим второй случай, когда на контактной поверхности нанесены строганием треугольные микровыступы, представляющие собой параллельные равноотстоящие друг от друга полоски (см. рис. 1, в, г и рис. 4, б) постоянной ширины (их ширину обозначим через *S*). Площадь контактной поверхности *F* (заштрихованные области на рис. 4, б) может быть описана выражением

$$F = 4 \sum_{i=i}^{n} \int_{\underline{x_i}}^{\overline{x_i}} \sqrt{R^2 - x^2} dx, \quad (8),$$

где

$$\overline{x_i} = \frac{R \cdot (2i - 1 + S)}{2 \cdot n}, \; \underline{x_i} = \frac{R \cdot (2i - 1 - S\prime)}{2 \cdot n},$$

n – количество полосок на половине круга.

Заменяя каждый интеграл площадью прямоугольника шириной $S \cdot R/n$ и высотой

$$\sqrt{R^2 - \left(\frac{2i-1}{2n}\right) \cdot R^2},$$

получим выражение для приближенного вычисления площади контакта

$$F = \frac{4 \cdot S \cdot R^2}{n} \sum_{i=1}^{n} \sqrt{1 - \left(\frac{2i-1}{2n}\right)^2} \quad (9)$$

Так как выражение (9) является приближенной формулой для вычисления площади круга по методу прямоугольников, необходимо оценить погрешность предложенного выражения. Поскольку вторая производная подинтегральной функции не непрерывная при $X = R$, для оценки погрешности разобъем участок интегрирования на два интервала. Первый интервал от 0 до $\left(\frac{2n-2}{2n}\right) \cdot R$ и второй от $\left(\frac{2n-2}{2n}\right) \cdot R$ до R.

Для первого участка погрешность будет составлять (согласно метода прямоугольников):

$$R_1 = \frac{R^2}{24} \cdot \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{2n-2}{2n}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$

или

$$|R_1| = \frac{R^2 \cdot n}{24 \cdot (2n-1)^{\frac{3}{2}}}.$$

Для второго участка погрешность можно вычислить непосредственно:

$$R_2 = \int_{x_n}^{\overline{x_n}} \sqrt{R^2 - x^2}\,dx - \frac{R^2}{n} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{2n-1}{2n}\right)^2} =$$

$$= \frac{R^2}{n} \cdot \left[arcsin \sqrt{\frac{2n-1}{n}} - \frac{(n-1)\sqrt{2n-1}}{n^2} - \frac{\sqrt{4n-1}}{n^2} \right].$$

После несложных преобразований получим: $|R_2| \leq \frac{R^2}{3n\sqrt{n}}$.

Таким образом, математическая обработка полученных экспериментальных результатов по оценке влияния $(\mathrm{P}, \mathrm{T}, R_z)$ на формоизменение микровыступов, пластическую деформацию и образование контакта позволила получить выражение для расчета образующийся площади контакта (F, мм^2), а именно:

$$F = \pi \cdot R^2 \cdot S \qquad (10)$$

где: R – радиус образца в мм., S – относительная ширина контактных площадок (см. рис. 4) и принимающих значения (0< S <1).

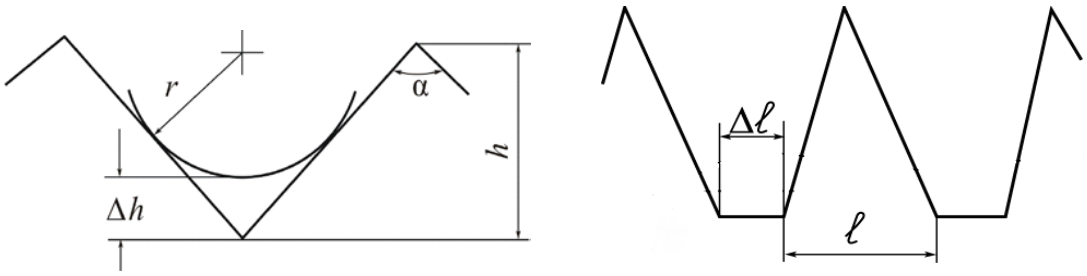
Выражение (10) позволяет, зная относительную ширину контактных площадок (определяется по кинетической экспериментально, т. е., это значение снимается с экспериментального графика функциональной зависимости $S = f(\mathrm{T}, \mathrm{P}, R_z)$) и радиус образца ($R$), рассчитать площадь образовавшегося контакта на любом этапе смятия микровыступов при чистовом выглаживании плоских металлических поверхностей или сварке давлением с нагревом. В наших экспериментах при обработке контактных поверхностей точением число кольцевых микровыступов (n) находится в пределах 130…132, а строганием n=17…18. После несложных преобразований получаем, что вычисленная погрешность определения заштрихованной площади F (рис. 4, а, б) контакта составляет ≈ 1 %. С применением выражения (10) были рассчитаны действующие ($\sigma_д$) нормальные микронапряжения 2-го рода, т. е. напряжения в контакте микровыступ (одно зерно) – сапфир, во всем интервале температур и давлений по известному выражению

$$\sigma_д = \frac{P}{F} \qquad (11)$$

и построены кинетические кривые изменения нормальных и касательных напряжений $\tau_д$ путем пересчета по известным формулам в каждый фиксированный момент времени.

Применение профилографов – профилометров контактного действия для съема информации о изменении топографических характеристик поверхности ограничено физическими возможностями применяемого метода. Важнейшими метрологическими характеристиками методик измерения шероховатости являются [17]: Δ_z– нижний предел измерения высоты микровыступов; Δ_x, Δ_y – разрешающая способность по полю; ν_{min} и ν_{max}

– границы диапазона частот микронеровностей. Для профилографов, как и для оптических устройств и методов контроля шероховатости, величина Δ_z измеряется сотыми долями микрометра, тогда как разрешение по полю $\Delta_{x,y}$ в десятки раз хуже этого показателя. Такое соотношение может создать видимость большой точности измерения координаты «Z» реального профиля по сравнению с координатами «X» и «У». В действительности, это не всегда так, вследствие различия условий измерения микровыступов при их смятии на различных этапах кинетической кривой образования контакта и наличия корреляционной связи между Δ_z и $\Delta_{x,y}$, устанавливаемой соотношением Ингельштамма [18]. Более того, величина $\Delta_{x,y} \neq 0$ задает не только верхнюю границу измеряемых частот микронеровностей $\nu_{max} = \Delta_{x,y}^{-1}$, но приводит к появлению дополнительной систематической погрешности измерения, зависящей не только от класса точности профилографа, но и от особенностей рельефа поверхности и характера его изменения во времени, что имеет место при сварке в твердом состоянии под давлением с нагревом и чистовом выглаживании [11, 12]. Эта составляющая погрешности наиболее существенна в тех случаях, когда угол α при вершине микровыступов (рис. 5, а, б) меньше 90°. Оценим возможную величину этой погрешности и покажем, что в отдельных случаях она может быть исключена специальным способом обработки профилограмм.



а ***б***

Рис. 5. Схема профиля микровыступов на контактной поверхности

Рассмотрим линейные однородные микронеровности, создаваемые на исследуемой контактной поверхности при её обработке резцом треугольного сечения с углом заточки α. Профиль такой поверхности можно аппроксимировать моделью, показанной на рис. 5, а.

Из геометрических построений легко видеть, что относительная систематическая погрешность профилографирования $\Delta h/\ h$ составляет:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{r \cdot (1 - \sin\frac{\alpha}{2})}{h \cdot \sin\frac{\alpha}{2}} = \frac{4 \cdot r \cdot \sin\frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \sin\frac{\alpha}{2}\right)}{l \cdot \sin\alpha}, \qquad (12)$$

где: r – радиус острия иглы профилографа (r = 2 мкм в нашем случае). Как видно из соотношения (12), погрешность измерения пропорциональна соотношению r/h или r/l, а с уменьшением угла α, при $h = const$, неограниченно возрастает. Соотношение (12) показывает также частотную зависимость погрешности $\Delta h/h$, т. к. величина l^{-1} является ничем иным, как числом микронеровностей на единице длины (частотой микронеровно-

стей). Численные значения погрешности измерения профилографом, в соответствии с выражением (12), для частного случая r = 2 мкм и высоты микровыступов h = 10 мкм, достигает 3 %; 8,5 % и 20 %, соответственно для α = 120°; 90° и 60°. Фактическая точность измерения может быть выше вследствие скругленности дна впадин между микровыступами, но во всех случаях оценки справедливы для микронеровностей, отстоящих на расстоянии порядка $\Delta_{x,y}$ или с малыми значениями угла α.

Рассмотренную погрешность можно исключить специальным способом обработки профилограмм. Эта возможность заложена в самой методике определения площади действительного контакта и величины пластической деформации микровыступов, основанный на сопоставлении профилограмм. Обычно, относительную деформацию микровыступов $E_{\text{м}}$ находят сравнивая (см. рис. 2 или 3) среднее значение исходной высоты (h_0) микровыступов с их средней высотой (h_t) в текущий момент времени (t) по формуле:

$$E_{\text{м}} = \left\{\frac{(h_0 - h_t)}{h_0}\right\} \cdot 100\ \%. \qquad (13)$$

Однако расчет по этой формуле относительной деформации микровыступов свариваемых поверхностей при их групповой осадке не учитывает того, что по мере развития процесса смятия микровыступов происходит изменение их боковых образующих (см. рис. 6), уменьшение угла между ними и сваривание их между собой [8, 9, 15]. Избежать соответствующего возрастания погрешности определения $E_{\text{м}}$ по формуле (13) можно, используя взаимосвязь между величиной $E_{\text{м}}$ и коэффициентом несущей части профиля, который численно равен относительной площади действительного контакта S, определяемой экспериментально по профилограммам путем измерения длин контактных площадок и точность измерения которого в широких пределах не зависит от угла α при вершине микровыступа.

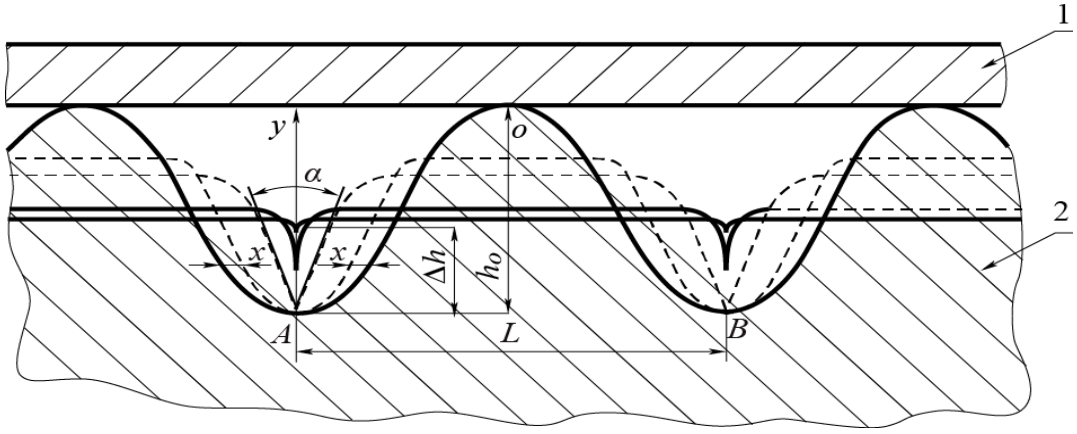


Рис. 6. Схема «кажущегося» подъёма нижней точки основания микровыступов на плоской поверхности при их пластической деформации: 1 – корунд; 2 – металл

Действительно, в рамках рассматриваемой модели линейных микровыступов треугольного сечения, становящихся последовательно трапе-

цеидальными и прямоугольными в результате их осадки, воспользуемся условием сохранения массы и объема микровыступов. Это означает, что на всех этапах смятия микровыступов площадь их сечения в плоскости профилографирования остается постоянной. Отсюда следует, что

$$E_{\text{м}} = \frac{S}{(1+S)} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{1}{(1+S)}. \tag{14}$$

Таким образом, процедуру измерения h_t для нахождения $E_{\text{м}}$ можно заменить процедурой измерения с высокой точностью S, избежав, тем самым, неточности контроля глубины впадин, зависящей от угла α и установленных особенностей и характера смятия микровыступов при их групповой осадке на контактных поверхностях при сварке давлением с нагревом и чистовой отделочной обработке металлических поверхностей плоским сапфировым инструментом [9, 15]. Для модели профиля, учитывающей «плоскостность» дна впадин (рис. 5, б), выражение (14) принимает вид:

$$E_{\text{м}} = \frac{S\cdot\left(1+\frac{\Delta l}{l}\right)}{\left[1+S\left(1+\frac{\Delta l}{l}\right)\right]}. \tag{15}$$

Как следует из анализа выражений (14) и (15), всегда $S > E_{\text{м}}$, а при S стремящейся к 1, $E_{\text{м}}$ стремится к 0,5. Тогда как прямые измерения h_t микровыступов и оценки величины пластической деформации $E_{\text{м}}$ по выражению (13) приводят к заключению, что $E_{\text{м}} > S$. В связи с этим, сопоставлять и анализировать кинетику роста прочности (схватывания) соединения материалов с кинетикой пластической деформации микровыступов при сварке давлением с нагревом не корректно и не позволяет получить объективную оценку процесса. Дифференцируя соотношения (14) и (15) можно найти скорость ($\dot{E_{\text{м}}}$) пластической деформации микровыступов:

для модели (рис. 5, а $\qquad \dot{E_{\text{м}}} = \frac{\dot{S}}{(1+S)^2}$ (16)

для модели (рис. 5, б) $\qquad \dot{E_{\text{м}}} = \frac{\dot{S}\cdot\left(1+\frac{\Delta l}{l}\right)}{\left[1+S\left(1+\frac{\Delta l}{l}\right)\right]^2}$ (17)

Выражения (16) и (17) показывают, что относительная площадь действительного контакта (S) возрастает всегда значительно быстрее, чем изменяется величина пластической деформации ($E_{\text{м}}$) микровыступов на контактных поверхностях. В качестве примера, на рис. 7, а, б приведено сопоставление кинетических кривых пластической деформации микровыступов обработки при сварке давлением с нагревом железо-никелевого сплава 50Н (Fe50 % + Ni50 %), рассчитанных по формуле (13) без учета особенностей смятия микровыступов (рис. 7,б, кривая а) и с учетом особенностей смятия (рис. 7,б, кривая б) по формуле (14) при одних и тех же параметрах сварки и выглаживания.

Это означает, что кинетическая кривая пластической деформации микровыступов должна всегда располагаться ниже кинетической кривой образования действительного контакта и переходящего в физический по достижении 0,6 от номинального на второй стадии смятия микровыступов

[15, 19, 20]. Сопоставлять и анализировать кинетику роста прочности (схватывания) необходимо с кинетикой развития контактных площадок на пластически деформирующихся микровыступах (или их скоростью!), а не с кинетикой пластической деформации микровыступов (или их скоростью!) с учетом их формоизменения и на основе четырех этапов смятия микровыступов, развивающихся микронапряжениях 2-го рода (нормальных σ и касательных τ), а также развивающихся физико-химических и механических процессов эстафетной передачи деформации из «мягкого» металла в более твердое тело (сапфир) [15]. При этом необходимо учитывать, что размер микровыступа соответствует размеру одного зерна металла. Это означает, что, рассчитывая $\sigma_{\text{д}}$ на каждой контактной площадке микровыступа определяем напряжения, компенсированные в объеме зерна, т. е., напряжения 2–го рода; путем пересчета по известным формулам определяем величину касательных напряжений 2-го рода, компенсированных в объеме зерна [21-23]. Получая экспериментальные значения S и подставляя их в выражение (14), можно рассчитать величину относительной пластической деформации ($E_{\text{м}}$) микровыступов свариваемых поверхностей. На рис. 7, а показана графическая взаимосвязь площади действительного контакта (S) с величиной относительной пластической деформации ($E_{\text{м}}$) микровыступов при сварке давлением с нагревом и чистовой отделочной обработке сапфиром плоских поверхностей.

Разработанная методика определения ($E_{\text{м}}$) и (S) была использована для установления количественных и качественных закономерностей кинетики образования контакта и пластической деформации микровыступов, а также формоизменения и характера смятия микровыступов на контактных поверхностях металлов при их чистовой отделочной обработке и получения поверхностей с регулируемыми и контролируемыми механическими свойствами, а также при сварке давлением с нагревом разнородных материалов с резко различной сопротивляемостью ползучести; также данная методика позволила рассчитать уровень микронапряжений 2-го рода на контактных площадках микровыступов и в объеме. Проведенный комплекс исследований позволил объяснить природу смещения кинетической кривой роста прочности (развития схватывания) между разнородными материалами и предложить механизм эстафтной передачи деформации от «мягкого» зерна металла в более твердый (сапфир). Кроме того, это позволило провести оценку корректности ранее опубликованных данных других авторов по оценке $E_{\text{м}}$ по формуле (13), выполненных без учета характера смятия микровыступов на свариваемых поверхностях.

Подтверждено существенное завышение $E_{\text{м}}$ при расчете по формуле (11) на основе прямых измерений h, причем ошибка достигает 100 % при $S \rightarrow 1$.

Принципиальное различие между схемами процесса сварки давлением с нагревом и чистовой отделочной обработки (выглаживания) состоит в следующем. При выполнении процесса по схеме сварки характер воздействия давления может меняться, но разъединения поверхностей не до-

пускается; т. е., процесс сварки ведется непрерывно без поступления в зону образующегося действительного контакта и при достижении 60% от номинального, переходящего в физический контакт, молекул и атомов кислорода в зону контакта не поступает (не образуется комплекс адсорбции) и начавшееся пластическое течение металла поверхностного слоя под действием микронапряжений 2-го рода обеспечивает непрерывную активацию контактных поверхностей и схватывание. Установлено, что величина действующих микронапряжений 2-го рода превышает величину временного сопротивления на разрыв металла, что приводит к разрушению кристалличности металла поверхностного слоя и образованию нанослоев жидкого металла в контакте. Таким оообразом, микронапряжения 2-го рода играют основную роль в активации контактных поверхностей при схватывании.

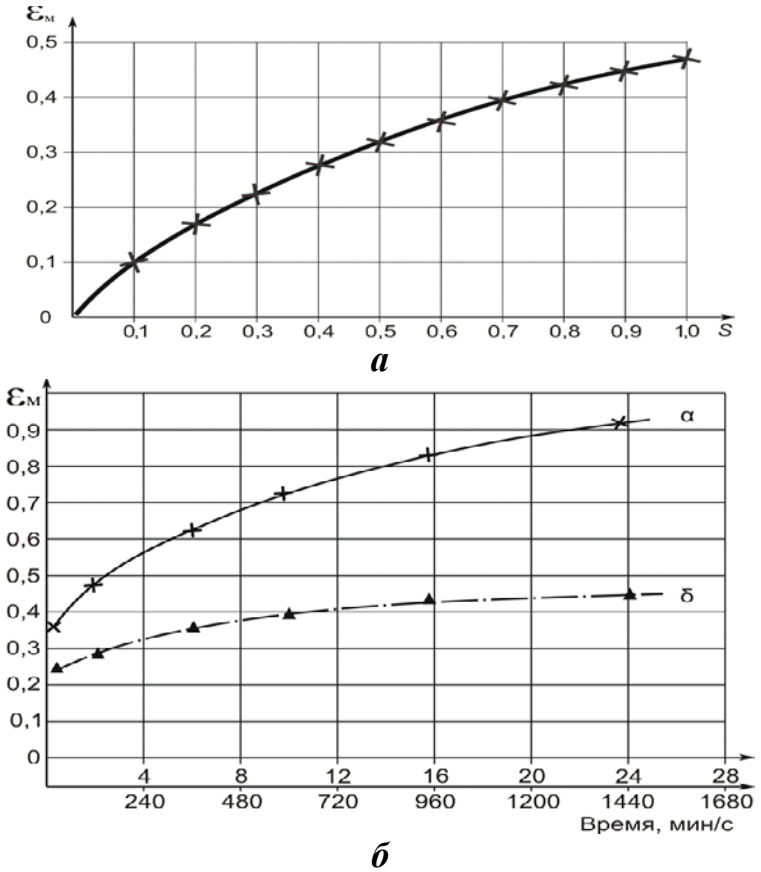


Рис. 7. Сопоставление кинетических кривых пластической деформации микровыступов обработки при сварке давлением с нагревом железо-никелевого сплава: а – графическая взаимосвязь площади действительного контакта (S) с величиной относительной пластической деформации (Ем) микровыступов; б – сопоставление кинетических кривых пластической деформации микровыступов сплава 50Н, построенных с по формуле (13) путем прямого измерения высоты h микровыступов (кривая а), и по формуле (12) с учетом особенностей смятия микровыступов, $T_{св}$ = 1423 К, $\sigma_н$ = 10 МПа (кривая б)

В противоположность этому, при выполнении процесса по схеме выглаживания, через определенные промежутки времени, устанавливаемые в соответствие с требованиями конкретного эксперимента или ТП и учетом характера смятия микровыступов, физико-химических свойств металла происходит разъединение контактных поверхностей металла и сапфирового диска. Таким оообразом, в этом случае создаются условия для насыщения контактных поверхностей молекулами и атомами кислорода и создаются условия для образования комплекса адсорбции и состояние физического контакта не достигается. Иначе говоря, контактные поверхности сапфира и микровыступов материала после разъединения «отравляются» комплексом адсорбции, что и препятствует достижению физического контакта.

Список литературы

1. Рыкалин Н.Н., Шоршоров М.Х., Красулин Ю.Л. Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов. Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы, 1965, № 1. Вып. 1. С. 20 – 25.

2. Красулин Ю.Л., Шоршоров М.Х. О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии. ФИЗХОМ, АН СССР, 1967, № 1. С. 15 – 18.

3. Красулин Ю.Л. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. М., Наука, 1971. 120 с.

4. Механика и физика контактного взаимодействия. Сб. трудов под ред. Демкина Н.Б., Калинин, КПИ. 1975, Вып. 1. 165 с.

5. Гаркунов Д.Н. Эффект безызносности при трении. Научные открытия в триботехнике. М., Изд. МСХА, 2004. 383 с.

6. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев, Техника, 1970, 395 с.

7. Шоршоров М.Х., Красулин Ю.Л. К расчету оценки режимов сварки давлением. Сварочное производство, 1967. № 7. С. 15-21.

8. Абрамов В.В., Бычкова З.С., Шоршоров М.Х. Кинетика топохимической реакции между медью и никелем при сварке в твердой фазе. ФИЗХОМ, 1972, №4. С. 15-21.

9. Абрамов В.В. Кинетика пластической деформации меди и никеля при сварке в твердой фазе. Сварочное производство, 1973, №2. С. 20–24.

10. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976, 263 с.

11. А.С. № 350640. СССР.М., Кл. В 24в 39/00. Способ отделочной обработки / Н.В. Урусов,В.В. Абрамов, В.Н. Стрельников и др. 2с.: Бюллетень №27, 1972.

12. А.С. №400488. СССР. М., Кл. В 28д. 5/00.Способ уплотнения сапфировых окон. / Н.В. Урусов, И.В. Бабашов, В.В. Абрамов и др. 2с.: Бюлл. №40, 1973.

13. Колмогоров Г.Д., Абрамов В.В., Неретин Н.А. и др. Особенности получения неразъемного соединения монокристаллического сапфира с некоторыми металлами сваркой давлением с подогревом. Электронная техника, 1976. Сер. 7, №8. С. 18-23.

14. Абрамов В.В. Исследование и разработка технологии получения неразъемного соединения некоторых разнородных материалов, применяемых в приборостроении. Авт. реф. канд. диссертации. М., ВНИИМП, 1971. С. 29.

15. Абрамов В.В. Кинетика взаимодействия разнородных материалов в твердом состоянии и разработка совмещенного технологического процесса выглаживания и получения неразъемного соединения при производстве приборов авиационной и электронной техники. Авт. реф. дисс. докт. техн. наук. М., МАТИ им. К.Э. Циолковского, 1990, 49 с.

16. Рубин и сапфир. Под ред. М.В. Классен-Неклюдовой и Х.С. Багдасарова. М., 1974. 236 с.

17. Карташов А.И. Шероховатость поверхности и методы ее измерения. М., Изд. Стандартов, 1964. 163 с.

18. Ингельштамм Д. Принцип оптической неопределенности и его применение к количественной информации, даваемой многолучевыми интерферометрами. М.: Изд. Стандартов, 1948. С. 24.

19. Абрамов В.В., Батищев В.В., Ракунов Ю.П. О механо-физико-химических явлениях на границе раздела твердых тел при термодеформационном воздействии. Волгоград, Вестник ВГАСУ, Сер.: строительство и архитектура, 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки, 2013. С. 71–74.

20. Шоршоров М.Х., Абрамов В.В., Алехин В.П. О природе задержки роста прочности соединения при сварке давлением с нагревом разнородных материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации. М., ФИЗХОМ, 1990, №1. С. 96-103.

21. Пинегин С.В. Контактная прочность и сопротивление качению. М., Машиностроение, 1969. С. 236.

22. Абрамов В.В., Ракунов Ю.П., Суэтина Т.А., Герасименко В.Б. Технические основы создания машин и оборудования предприятий строительных материалов. М., МГАКХИС, Граница, 2009. С. 430.

23. Абрамов В.В. Кинетика совмещенных процессов выглаживания и сварки давлением с нагревом разнородных кристаллических материалов с сильно различной сопротивляемостью пластической деформации. ФИЗХОМ, 2024, № 2.

Абрамов Валерий Васильевич, д-р техн. наук, профессор, valabramov@rambler.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

EVALUATION OF MICRO-LEDGE SHAPE CHANGE AND CONTACT DEVELOPMENT BETWEEN DISSIMILAR CRYSTALLINE MATERIALS UNDER THERMO-DEFORMATION EFFECTS

V.V. Abramov

A methodology for the study of contact interaction between dissimilar materials under thermo-deformation influence in time has been developed. Kinetic curves of contact formation, plastic deformation of micro ledges, change of micro ledge height, change of contact stresses on micro ledges, change of mechanical properties on the surface and depth of the contact volume of micro ledges in the interval of temperatures from room temperature to premelting and in the interval of pressures up to and after threshold values have been constructed. The shape change and character of buckling of micro ledges, kinetics of contact interaction between heterogeneous materials with sharply different resistance to plastic deformation and nature of chemical bonding under thermo-deformation influence are considered. It is shown that the plastic deformation of micro ledges is responsible for the contact formation and activation processes on the contact surfaces, and that the level of stresses of the 2nd kind on the contact sites of micro ledges considerably exceeds the nominal values of stresses included in the calculation formulas.

Key words: research methodology, contact interaction, character of microprotrusion collapse, kinetics, actual and physical contact, plastic deformation, sapphire, microstresses of the 2nd kind, smoothing, setting.

Abramov Valery Vasilyevich, doctor of technical sciences, professor, valabramov@rambler.ru, Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 614.89; 621.01
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-519-520

КОМПЛЕКТОВАНИЕ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ ПРИ УСТРАНЕНИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Л.А. Сладкова, С.Е. Хоцеловский

Из материалов докладов «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» видно, что число ЧС техногенного характера значительно превышает число ЧС природного характера, как по численности, так и по числу летальных исходов. Рассматривая разрушения зданий и сооружений как одной из разновидностей ЧС техногенного характера, исходя из геополитического положения страны видно, что эта цифра имеет тенденцию к увеличению. Очевидно, что техногенные катастрофы становятся прерогативой в регионах с высокой плотностью населения (мегаполисах) и высокой степенью застройки, что ведет к увеличению и масштабности объемов разрушений. Результатом исследования, в соответствии с целью работы является предлагаемый в статье алгоритм выбора видов и числа средств механизации при устранении последствий чрезвычайных ситуаций. Научная новизна предлагаемого алгоритма заключается в том, что он позволяет, в отличие от известных и используемых в практической деятельности, учитывать основной фактор при проведении операций – время как один из показателей функционально-стоимостного анализа. Алгоритм также позволяет оценить качественно комплект и число привлекаемых единиц техники. Предлагаемая методика позволяет с достаточной для решения практических задач степенью точности сформировать комплект средств технологического назначения для ликвидации последствий ЧС. Предлагаемая методика для эффективности принятия оперативного решения при ликвидации последствий ЧС на практике позволяет на основе предлагаемого алгоритма создать нейронную сеть для реализации задач при выборе необходимых сил и средств (оборудования) оборудования в условиях ЧС.

Ключевые слова: средства механизации, техника двойного назначения, техногенная авария, чрезвычайная ситуация, формирование комплект техники.

Техногенные катастрофы становятся прерогативой в регионах с высокой плотностью населения (мегаполисах) и высокой степенью застройки, что ведет к увеличению и масштабности объемов разрушений. Ситуация при ликвидации последствий ЧС требует быстрого принятия решения по формированию видов техники основного технологического назначения,

оперируя неполным объемом данных на момент возникновения ЧС. Поэтому целью работы является формирование сил и средств подразделений ГО ЧС для своевременного устранения последствий чрезвычайных ситуаций и оценка необходимости привлечения технических средств сторонних организаций, с учетом объемов разрушений.

Материалами для проводимых исследований о характере и объемах разрушений в различных регионах Российской Федерации служили статистические данные Роскомстата и базы данных по стоимостным и тактико-техническим характеристикам машин привлекаемых для ликвидации последствий ЧС видов техники.

Успешное устранение последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера в сжатые сроки определяется степенью их механизации, где может использоваться различные наземные транспортно-технологические средства.

Основными задачами отрядов ликвидации чрезвычайных ситуаций техногенного характера являются обеспечение безопасности жизни людей, восстановление и функционирование объектов народного хозяйства в кратчайшие сроки, что невозможно осуществить без наличия средств механизации [1] и специальной техники [2], численность которой должна быть укомплектована [3] по назначению и применению в зависимости от объемов разрушений в различных условиях сложившейся обстановки.

По данным отчетных документов [4] в 2022 г. число чрезвычайных ситуаций техногенного характера (67,77%) более, чем в два раза превышает число ЧС природного характера (32,23%), а число погибших изменяется на порядок: соответственно 90,95% и 9,05%, что существенно превышает численность аварий, произошедших в 2021 г. Одной из основных причин такого скачка явился террористический акт на Крымском мосту, который отнесен к разряду ЧС регионального характера (табл. 1) и крушение самолета СУ-34 в Краснодарском крае.

Таблица 1

Распределение чрезвычайных ситуаций техногенного характера по округам

№ п/п	Территориальная единица (федеральный округ)	Число аварий	%
1.	Центральный федеральный округ	38	30,16
2.	Северо-Западный федеральный округ	10	7,94
3.	Северо-Кавказский федеральный округ	6	4,76
4.	Южный федеральный округ	43	34,13
5.	Приволжский федеральный округ	21	16,67
6.	Уральский федеральный округ	5	3,97
7.	Сибирский федеральный округ	20	15,87
8.	Дальневосточный федеральный округ	21	16,67
	Всего по округам	126	

Последние события, произошедшие 22 марта 2024 года в концертном зале «Крокус_сити_холл» (г. Москва) показали эффективность применения

роботов [5] и робототехнических платформ при ликвидации последствий ЧС [6] только после проведения предварительных работ, связанных с применением механизированного инструмента при разборе завалов от большемерных элементов металлических и бетонных конструкций, где применение специализированной техники было неприемлемо.

Исходя из сказанного следует, что для ликвидации последствий ЧС требуется оснащение подразделений ЧС различными видами техники, включая робототехнические платформы и механизированный инструмент, номенклатура и количественный состав которых определяется как объемом разрушений, так и его видами.

Исходя из сказанного, целью предлагаемой статьи является обоснование методики выбора средств комплексной механизации с учетом их роли в устранении последствий чрезвычайных ситуаций. Результативность ликвидации последствий ЧС техногенного характера определялась исходя из опыта предыдущих аварий «на глазок», что вело либо к простою техники, либо ее недостаточности, либо к невозможности ее использования. Причиной такого результата является, во-первых, отсутствие средства механизации в подразделениях ЧС, за исключением автомобильного транспорта.

Механизация организаций, связанных с ликвидацией чрезвычайных ситуаций началась с момента создания в России корпуса спасателей в 1991 г. Отряды спасателей укомплектовывались, в основном, автомобильным транспортом (табл. 2), модифицированным для перебазировки личного состава, специализированного оборудования, а также оказания помощи пострадавшим [3, 4, 7] посредством которого нельзя решать задачи ликвидации последствий ЧС техногенного характера, связанных с разборкой завалов от строительных конструкций и т.п.

Таблица 2

Специализированный автомобильный транспорт в номенклатуре отрядов ЧС для ликвидации последствий техногенных катастроф

№ п/п	Специализированный автомобильный транспорт	Назначение
1.	Lada 4x4 от компании «Супер-Авто»	Доставка личного состава
2.	АСМ-41-024 на базе Land Rover Defender	Доставка личного состава
3.	Автомобиль МЧС УАЗ-315195	Доставка личного состава и оказание первой помощи
4.	Автомобили на базе КАМАЗ-4308-Н3	Для перевозки отделения военизированных горноспасательных частей МЧС России
5.	Автомобиль на базе ГАЗ-27057	Оказание медицинской помощи
6.	УАЗ-3962 МЧС	Доставка личного состава
7.	Автомобиль МЧС на шасси КамАЗ 43118	Доставка личного состава и специализированного оборудования
8.	Автомобиль МЧС на базе "Садко"	Доставка личного состава и специализированного оборудования
9.	АСМ-48-031РХ	Ведение работ в зонах радиационного и химического загрязнения, наличие передвижной лаборатории для оценки ситуации
10.	Грузовики МЧС МАЗ	Доставка гуманитарной помощи, оказание первой помощи
11.	Автомобиль-фургон МЧС на базе КАМАЗ-43118	Доставка гуманитарной помощи, оказание первой помощи
12.	Volkswagen Transporter	Для спасательных работ на водных объектах

Парк автотранспорта создавался на базе модернизированных и переоборудованных для специальных целей автомобилей марок «Land Rover» и «Нива». Вся техника специального назначения, выпускаемая отечественным автопромом на базе автомобилей УАЗ и «ГАЗель», была полноприводной, что позволяет обеспечивать высокую проходимость в труднодоступных регионах.

Каждая машина оснащалась механизированным инструментом (средствами малой механизации): кусачки, резаки, ножницы, расширители, домкраты и т.п. Прилагаемыми к технике средствами можно было выполнять работы, не требующих больших усилий. Например, для извлечения пострадавших из труднодоступных мест (завалов), перекусывать металлические стержни арматуры (до 32 мм), приподнимать бетонные плиты и другие грузы весом не более 10 тонн на высоту не более 260 мм, расширять узкие проемы в завалах до 800 мм [2].

В качестве источников энергии средств малой механизации использовались генераторы, перевозимые на той же самой технике.

Для работы в темное время суток все машины, находящиеся в ведомстве службы спасения, оснащены прожекторами, оборудованием для ограждения опасных мест, также шанцевым инструментом (лопаты, топоры и т.д.).

Очевидно, что кроме специализированного автотранспорта, находящегося на балансе отрядов специального назначения, для устранения последствий ЧС, требуется наличие специальной техники, имеющей в народном хозяйстве двойное назначение. Это грузоподъемные средства (стреловые самоходные краны), экскаваторы, погрузчики, автогрейдеры, катки, т.е. те виды специальной техники, которые помогают быстро и эффективно решить поставленные задачи: разбор завалов, перегрузка элементов строительных конструкций, подготовка подъездных путей и т.п. (табл. 3).

Таблица 3

Спецтехника двойного назначения, применяемая для ликвидации последствий техногенных катастроф

№ п/п	Специализированные машины основного технологического назначения	Назначение
1.	Бульдозеры различного типоразмера	Подготовка подъездного пути, разборка завалов
2.	Автогрейдер	Подготовка подъездного пути (засыпка воронок, обустройство валов и земляных насыпей), расчистка территории,
3.	Экскаватор. имеющий сменное рабочее оборудование (ковш типа прямая и обратная лопата, молот, грейфер); миниэкскаваторы	Разборка завалов
4.	Фронтальный погрузчик (с вилочным захватом и ковшом)	Разборка завалов
5.	Мини погрузчик, телескопический погрузчик	Разборка завалов, расчистка территории
6.	Средства малой механизации (лебедки, пневмо- и гидроинструмент, отбойные молотки, домкраты и пр.)	Разборка завалов, вскрытие заваленных сооружений, подъем с последующим перемещением и погрузкой обломков конструкций, создание отверстий в каменных или бетонных стенах, обеспечивающих подачу воздуха

7.	Вспомогательное оборудование	Компрессорные станции, авторазливочное оборудование, прожекторы (осветительные устройства)
8.	Робототехнические комплексы [6] (средства инженерного обеспечения) МРК-01, МПРК-45	Пиротехнические работы
9.	Машины оборонного комплекса ИМР, БАТ-2, БАТ-2М,	Проделывание проходов через завалы
10.	Автосамосвалы	Отгрузка обломков конструкций

Указанные в табл. 3 виды техники, как правило, находятся на балансе строительных организаций, объектах жилищно-коммунального хозяйства, дорожно-строительных управлений. Необходимость ее привлечения на объекты МЧС очевидна, так как позволяет быстро и эффективно устранять все виды чрезвычайных ситуаций (отгрузка крупногабаритных конструкций, удаление мусора, подготовка подъездных путей, эвакуация техники и т.д.). По данным источника [8] рассматриваемая выше техника имеет средства по разборке завалов, перегрузке элементов конструкций, защиты персонала, например, в пожароопасной ситуации (автоматическое тушение пожара) и т.п.

К первоочередным задачам при ликвидации последствий ЧС относятся операции по созданию проездов и проходов к разрушенным объектам, туда, где находятся люди. Основным поставщиком грузоподъемной техники, предназначенной для ведения спасательных работ, по прокладке проходов является АО «Галичский автокрановый завод», выполняющий заказы ведомства по ликвидации последствий ЧС.

Комплектность машин для ликвидации последствий ЧС предусмотрена нормативами [9]. В этом документе для ликвидации последствий ЧС учитывается наименование техники по применяемым видам и необходимому количеству. Все виды вводимых единиц техники предлагается оценивать по величине коэффициентов корректирования норм разработки $К_1$, $К_2$ и $К_3$, расходу моторесурса техники за время участия в ликвидации последствий ЧС с указанием даты и номера акта о его списании. Как показала практика, все «упирается» в пресловутый коэффициент корректировки, который для механизации трудоемких процессов при ликвидации последствий ЧС не позволяет правильно подобрать комплекты и комплексы специальной и специализированной техники в соответствии с их назначением, применением, тактико-техническими характеристиками и объемом разрушений.

Из сказанного следует, что в настоящее время не в полной мере отработана методика комплектования подразделений ЧС специальной техникой и механизированными инструментами не только в зависимости от объемов разрушений, но и от использования по назначению.

Предлагаемая методика формирования комплектов наземных транспортно-технологических средств из числа видов техники двойного назначения (комплексная механизация) базируется на расчете сил и средств для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Очевидно, что расчет сил и средств для ликвидации последствий ЧС зависит от величины ущерба и, соответственно, комплекса работ, проводимых для его устранения. По данным [10] в 2022 году экономический ущерб составил 47866554 р. по сравнению с данными 2021 года – 7828395 р.

Подбор машин необходимо производить, основываясь на их эксплуатационных параметрах [10, 11], назначении и их применении, масштабов повреждений при выполнении работ в зоне чрезвычайных ситуаций. Здесь могут быть задействованы наземные транспортно-технологические средства, имеющиеся в наличии на строительных и дорожных объектах, а также в смежных организациях. Для решения поставленной задачи используются информационно-аналитические методы [12], методы математического [13] и логического моделирования [14]. Использование этих методов требует наличия большой базы данных и представляет собой достаточно сложный математический аппарат [15] для понимания оператора, участвующего в ликвидации последствий ЧС [16].

Мы выражаем согласие с автором труда [17] и автором труда [18] что для выбора эффективных показателей при формировании технических средств при ликвидации последствий ЧС целесообразно пользоваться, в том числе, их экономическими показателями.

Предлагаемая методика комплектования средств механизации с учетом их роли в устранении последствий чрезвычайных ситуаций основана на обосновании выбора перечня работ при ликвидации последствий ЧС в зоне разрушений техногенного характера, которые зависят от характера, масштабов разрушения и видов предстоящих работ. Каждый из видов работ характеризуется конкретной величиной затрат C_i:

- разведка очага поражения - C_1;
- поиск пострадавших - C_2;
- устройство проездов в завалах - C_3;
- извлечение пострадавших из-под завалов - C_4;
- восстановление объектов - C_5 (проходит как отдельная комплексная статья);
- затраты на эксплуатацию техники - C_6;
- неучтенные расходы (стоимость материалов, снаряжения, заработная плата персоналу и т.п. - C_7;
- оказание медицинской помощи пострадавшим (при необходимости) - C_8;

Тогда затраты C (руб) на проведение указанных выше работ будет равны:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8. \quad (1)$$

Указанные виды затрат можно рассчитать по следующей методике.

Количество единиц техники, в первую очередь, определяется технологией ведения их работ. При этом необходимо учитывать, чтобы работающая при устранении последствий ЧС техника не мешала друг другу. Это условие может быть достигнуто при разработке плана создания подъездных путей при транспортировке разрушенных элементов.

Очевидно, что к техногенным причинам разрушения зданий и сооружений является взрывная волна, образующаяся от детонации бытового газа, пиротехнических изделий, складов с боеприпасами, находящимися вблизи строительных сооружений, а также от действия взрывов оружия общего поражения.

Перед тем как приступить к формированию средств механизации для устранения последствий чрезвычайных ситуаций, необходимо провести оценку объемов разрушений. Для этих целей разработаны рекомендации [7, 19], по которым объем завала можно оценить по приближенной формуле:

$$V = (0{,}05 \dots 0{,}2)abh, \qquad (2)$$

где a, b, h – соответственно длина, ширина и высота здания, м; (0,05…0,2) – тангенс угла естественного откоса обрушенных элементов конструкции.

Уточненную оценку степени разрушений при различных видах взрывных воздействий авторы [20] рекомендуют проводить по величине избыточного давления $\Delta P_{фк}$ в зависимости от величины заряда в тротиловом эквиваленте по зависимости:

$$\Delta P_{\text{фк}} = 95\frac{[1+(\frac{7000}{G})^2]^{1/6}}{\chi_{\text{п}}} + 390\frac{[1+(\frac{7000}{G})^2]^{1/3}}{\chi_{\text{п}}^2} + 1300\frac{[1+(\frac{7000}{G})^2]^{1/2}}{\chi_{\text{п}}^3}, \qquad (3)$$

где G – масса взрывчатого вещества, кг; $\chi_{\text{п}}$ – константа уровня поражения, приведенная в табл. 4.

Таблица 3

***Константы уровня поражения* [21]**

$\Delta P_{\text{фт}}$, (кПа)	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\chi_{\text{п}}$	23	13,5	8,2	6,4	5,4	4,7	4,3	4,0	3,7	3,5	3,3

К тому же, поражающее действие взрыва по данным и [22] в зависимости от величины избыточного давления $\Delta P_{фк}$ имеет градацию:

- слабой;
- средней;
- сильной.

Анализ поражающего действия взрыва показал, что уровень разрушения также зависит от конструктивных особенностей объекта.

Приведем пример оценки степени разрушения при взрыве 10 кг тротила для: слабых, средних и сильных разрушений. При величине избыточного давления 10 – 20 кПа поражающее действие взрывов (в эквиваленте 10 кг тротила) для промышленного здания бескаркасной конструкции и с лёгким металлическим каркасом является легким, а для кирпичного многоэтажного (3 и более этажа) – средним, что оказывает существенное влияние на формирование средств механизации для устранения последствий ЧС.

Например, при разборке завалов для подготовки рабочего пространства используются бульдозеры. Для отгрузки элементов конструкций в самосвалы – экскаваторы и стреловые самоходные краны. Независимо от поражающего действия взрыва считается, что рекомендуемое нормативами[5] число бульдозеров и экскаваторов должно быть равно числу обрушенных зданий. Мы согласны с автором [12] в том, что численность самосвалов

определяется из условия обеспечения непрерывной работы экскаватора (крана).

Например, автор [23], не опираясь на один из основных факторов – время, считает, что для разбора обеспечения работы экскаватора с емкостью ковша (0,5…0,65) м^3 и дальностью перевозки грунта на расстояние 1 км необходимо 4 автосамосвала грузоподъемностью 5 т.

Учитывая, что под завалами находятся люди, очевидно, что для оценки числа единиц техники, определяемой для устранения завалов, необходимо исходить из показателя времени t, часов, которое, по можно определить по зависимости:

$$t = \frac{V}{\text{П}}, \quad (4)$$

где V – объем завала, м^3; П – производительность единицы техники, м^3/ч, определяемая по нормативным данным в соответствии с ее тактико-техническими характеристиками.

Составляющие затрат предлагается оценивать по нижеприведенным известным соотношениям[8], которые с учетом объемов разрушений и производительности специализированной техники позволяют создать нейронную сеть позволяющую найти рациональное решение поставленной задачи исходя из сил и средств подразделений ГО ЧС.

Стоимость амортизации C_A используемых технических средств, стоимость израсходованного горючего $C_\text{Г}$ и стоимость израсходованного горюче-смазочных материалов $C_\text{ГСМ}$ определяем по зависимостям, руб:

$$C_A = \sum_{i=1}^{m} n_i C_{Ti}\, At_i; \quad (5)$$

$$C_\text{Г} = \sum_{i=1}^{m} n_i C_{\text{Г}i}\, q_i t_i, \quad (6)$$

$$C_\text{ГСМ} = \sum_{i=1}^{m} 0{,}04 \cdot n_i C_{\text{ГСМ}i}\, q_i t_i, \quad (7)$$

где m – количество видов технических средств; - n_i – число і-го вида техники; - C_{Ti} – первоначальная стоимость -го вида техники, руб; - A – норма амортизации і-го вида техники; - t_i – время работы і-го технического средства; - $C_{\text{Г}i}$ – цена горючего, руб/л; - q_i – расход горючего і-м техническим средством, л/ч; - $C_{\text{ГСМ}i}$ – стоимость израсходованных горюче-смазочных материалов, руб.

Приведенные расчетные зависимости требуют знания большого объема справочных материалов.

Предлагается определять перечисленные выше затраты (амортизационные отчисления, горючее и горюче-смазочные материалы определять по нижеприведенному алгоритму.

Стоимость амортизации -го вида техники равна

$$C_{Ai} = KA, \quad (8)$$

где K – размер капитальных вложений на приобретение -го вида техники, руб.

Здесь

$$K = \text{Ц}_\text{б} + K_\text{э}, \quad (9)$$

где $\text{Ц}_\text{б}$ – расчетно-балансовая стоимость машины, руб; $K_\text{э}$ – дополнительные затраты, связанные с вложениями в основные производственные фонды.

Величина этих затрат принимается равной $6 \ldots 8\%$ от расчетно-балансовой стоимости техники.

Расчетно-балансовая стоимость машины определяется добавлением к её отпускной цене ($Ц = C_{Ti}$) транспортных расходов на её доставку:

$$Ц_б = Ц \cdot k, \quad (10)$$

где k – переходной коэффициент от оптовой цены к расчетно-балансовой стоимости. Рекомендуется принимать $k = 1{,}07$;

Ц – оптовая цена техники, руб.

Учитывая, что эксплуатация модернизированной техники не вносит существенных изменений в процесс ТО, Р и КР, то величину $K_э$ определим по зависимости:

$$K_э = 0{,}07 \cdot Ц_б, \quad (11)$$

С другой стороны, величина общие затраты на численность *i*-го вида техники для устранения последствий чрезвычайных ситуаций, исходя из фактора времени, определим по формуле

$$C = \sum_{i=1}^{m} n_i K_i A_i t_i, \quad (12)$$

где - n_i – число і-го вида техники; - K_i – размер капитальных вложений і-го вида техники, руб; A – норма амортизации і-го вида техники; t_i – время работы і-го технического средства.

Используя зависимости (1), (2), (4) и (5) определим число единиц *i*-го вида техники, необходимого для устранения завала

$$n_i = \frac{1{,}07\Sigma K_i k П_i}{V} = \frac{1{,}1449\Sigma K_i П_i}{(0{,}05 \ldots 0{,}2)abh}. \quad (13)$$

Из расчета видно, что число единиц *i*-го вида техники можно оценить в первом приближении по эмпирической зависимости, приведенной в выражении (13).

Вывод. Предлагаемая выше методика выбора средств комплексной механизации позволяет с высокой степенью точности сформировать комплект средств технологического назначения при оценке численности видов привлекаемой техники для ликвидации последствий ЧС с учетом на только объемов разрушений, но и дополнительных задач (разведка очага поражения; поиск пострадавших; устройство проездов в завалах; извлечение пострадавших из-под завалов; оказание медицинской помощи пострадавшим и пр.).

Список литературы

1. Виноградов А.Ю. Аварийно-спасательные и специальные машины для оснащения формирований МЧС России // Технологии гражданской безопасности. 2019. № 2. С. 33 – 39.

2. Ососова Н.А. Современная аварийно-спасательная техника. / Материалы Всероссийской научно-практической конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения». Томск. Изд-во ТПУ. 2015. С. 232-236.

3. Масаев С.Н., Минкин А.Н., Сергеев И.Ю. Аварийно-спасательная техника для проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ на малообъемных и рассредоточенных объектах // Журнал Сибирского ферального университета. Техника и технологии. [Электронный ресурс]. URL: https://research.sfu-kras.ru/publications/publication/34899063 (дата обращения: 02.03.2024).

4. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году». М.: Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. 365 с.

5. Баранник А.Ю., Лагутина А.В., Дудоров Е.А. Обоснование комплекта специального оборудования, предназначенного для ведения аварийно-спасательных работ с использованием много функциональных автономных робототехнических платформ // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. 1. [Электронный ресурс]. URL: https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/issue/view/30 (дата обращения: 02.03.2024).

6. Rekleitis I., New A.P., Rankin E.S., Choset H. Efficient Boustrophedon Multi-Robot Coverage: an algorithmic approach, Ann Math // Artif Intell. 2008. P. 52-109.

7. Какие автомобили использует МЧС России. / [Электронный ресурс] URL: https://dzen.ru/a/W6yILBxalgCqa8UN (дата обращения: 20.03.2024).

8. Роль спецтехники в ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах коммунального хозяйства. / [Электронный ресурс]. URL: https://vc.ru/u/1852574-texbaza-group/733938-rol-spectehniki-a-likvidacii-chrezvychaynyh-situaciy-na-obektah-kommunalnogo-hozyaystva?ysclid=lsojewoexq 323219982 (дата обращения: 20.03.2024).

9. Приказ МЧС России от 01.10.2020 N 737 «Об утверждении Руководства по организации материально-технического обеспечения Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий». [Электронный ресурс]. URL: https://perevozka24.ru/pages/galichskiy-avtokranovyy-zavod-glavnyy-postavschik-spasatelnogo-oborudovaniya-?ysclid=lsojyixxgy185524999 (дата обращения: 20.03.2024).

10. Кушляева О.В., Кушляев В.Ф. Совершенствование эксплуатационных параметров рабочих органов машин, применяемых в чрезвычайных ситуациях, путем оптимального проектирования / Сборник трудов секции № 10 XXVIII Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь». Академия гражданской защиты МЧС России. М.: 2018. С. 79-87.

11. Подбор комплекта и комплекса спасательной техники для выполнения работ в зоне чрезвычайной ситуации / [Электронный ресурс]. URL: https://kazedu.com/referat/187534/24 (дата обращения: 17.02.2024).

12. Снитюк В., Кучер П. Информационно-аналитические модели и эволюционные аспекты решения задачи комплектования // International Book Series "Information Science and Computing". С. 133-138.

13. Snytyuk V., Kucher P. Problem and mathematical models for rescue technics acquisition // International Journal Information Theories and Applications. 2014. Vol. 21. Issue 1. P. 60–64.

14. Zadeh, L. A. Fuzzy logic, neural network and soft computing // Communications of the ACM. 1994. Vol. 37, Issue 3. P. 77-84.

15. Lodi A., Martello S., Vigo D. Recent advances on two-dimensional bin packing problems. Discrete Applied Mathematics. 2002. Vol. 123, Issue 1−3. P. 379–396.

16. Silvano M., Toth P. Knapsack problems. // John Wiley and Sons. Chichester, UK 1990. P. 221.

17. Масаев С.Н., Минкин А.Н., Едимичев Д.А. Эффективные показатели оптимального выбора аварийно-спасательной техники для малообъемных и рассредоточенных объектов // Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник». 2019. 4. С. 82-89. [Электронный ресурс]. URL: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2019/v4/N15_82-89.pdf (дата обращения: 02.04.2024).

18. Andruseac G. Economic security–new approaches in the context of globalization // CES Working Papers. 2015. 7(2). pp. 232-240.

19. Шойгу С.К. Гражданская защита: энциклопедия. В 4 т. Том I (А-И); М.: МЧС России. Московская типография. № 2. 2006. 458 с.

20. Горбунов С.В., Макиев Ю.Д., Малышев В.П. Анализ технологий прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Проблемы прогнозирования. 2011. 1(1). С. 43-52.

21. Храмов Г.Н. Техногенные взрывы: учебное пособие. С.-Пб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 2007. [Электронный ресурс]. URL: https://elib.spbstu.ru/dl/local/1481/pdf (дата обращения: 02.04.2024).

22. Woolfolk R.W., Ablow C.M. In Proc. of Conf. on Mechanisms of Explosion and Blast Waves // Feltman Research Laboratory, Picatinny Arsenal, Dover, №. I. 1973. P. 42.

23. Васильев В.И. Устойчивость объектов экономики в ЧС: учебное пособие. С.-Пб. 2006. 318 с.

Сладкова Любовь Александровна, д-р техн. наук, профессор, rich.cat2012@yandex.ru, Россия, Москва, Российский университет транспорта,

Хоцеловский Степан Евгеньевич, аспирант, stepa_hocelovski@mail.ru, Россия, Москва, Российский университет транспорта

MANNING OF MECHANIZATION EQUIPMENT IN THE ELIMINATION OF THE CONSEQUENCES OF EMERGENCIES

L.A. Sladkova, C.E. Khotselovsky

Considering the destruction of buildings and structures as one of the varieties of man-made emergencies, based on the geopolitical position of the country, it is clear that this figure tends to increase. It is obvious that man-made disasters are becoming the prerogative in regions with a high population density (megacities) and a high degree of development, which leads to an increase in theand the scale of the destruction. The result of the study, in accordance with the purpose of the work, is the algorithm proposed in the article for choosing the types and number of mechanization means in the elimination of the consequences of emergency situations. The scientific novelty of the proposed algorithm lies in the fact that it allows, unlike the well-known and used in practice, to take into account the main factor in operations - time as one of the indicators of functional cost analysis. The algorithm also allows you to qualitatively assess the set and number of units of equipment involved. The proposed methodology makes it possible to form a set of technological tools for the elimination of the consequences of emergencies with a degree of accuracy sufficient to solve practical problems. The proposed methodology for the effectiveness of operational decision-making in the elimination of the consequences of emergencies in practice allows, on the basis of the proposed algorithm, to create a neural network for the implementation of tasks when choosing the necessary forces and means (equipment), equipment in emergency conditions.

Key words: means of mechanization, dual-use equipment, man-made accident, emergency, formation of a set of equipment.

Sladkova Lyubov Aleksandrovna, doctor of technical sciences, professor, rich.cat2012@yandex.ru, Russia, Moscow, Russian University of Transport,

Khotselovsky Stepan Evgenievich, postgraduate, stepa_hocelovski@mail.ru, Russia, Moscow, Russian University of Transport

УДК 621.9.06-52
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-530-531

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ЗАХВАТА СТЕРЖНЕВЫХ СТУПЕНЧАТЫХ ЗАГОТОВОК В БУНКЕРНОМ ЗАГРУЗОЧНО-ОРИЕНТИРУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ С НАКЛОННЫМ ДИСКОМ И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМИ КАРМАНАМИ

А.А. Борисов

В статье представлены результаты теоретического исследования вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерном загрузочно-ориентирующем устройстве с наклонным диском и тангенциальными карманами и степень влияния на вероятность захвата различных параметров устройства и заготовок, при которых будут обеспечены ее максимальные значения.

Ключевые слова: вероятность захвата заготовок, автоматическая загрузка, ориентирование ступенчатых заготовок, бункерное загрузочно-ориентирующее устройство.

В основе построения математических моделей вероятности захвата заготовок тел вращения в механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах (БЗУ) лежит представленная в работах [1-3]

методология. Построенные на ее основе математические модели адекватно описывают процесса захвата различных видов заготовок на основе теории вероятностей [5], что было неоднократно подтверждено проведенными многочисленными верификациями с использованием натурных образцов и макетов механических БЗУ многих типов [7-12]. В основе данной концепции заложены основы теории вероятностей, которая позволяет описать принципы захвата единичной заготовки из общей массы. Основываясь на данной концепции для описания влияния на производительность БЗУ его конструктивных и кинематических параметров, геометрических параметров заготовок, коэффициентов трения между ними, была разработана математическая модель вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами [13].

В частности, математическая модель вероятности захвата цилиндрических ступенчатых заготовок в зависимости от их типа имеет

$$\eta = p_i \times \left(1 - \frac{\arctan(\mu_0)}{\frac{25\sqrt{2}\pi}{2}[d_1^2 + 2d_1 l_1 + 2d_2(l - l_1)]} \cdot \left[\begin{matrix} \sqrt{2} \cdot 3d_1^2 + 2d_1^2 + \\ +10d_1 l_1 + 10d_2(l - l_1) \end{matrix} \right] \right) \times p_\upsilon,$$

в котором, кроме размеров заготовки (рис. 1), имеются параметры: значение коэффициента трения μ_0 между поверхностями заготовок; вероятности p_i и p_c характеризующие соответственно благоприятное положение предмета для его захвата и отсутствие помех от сцепляемости заготовок друг с другом.

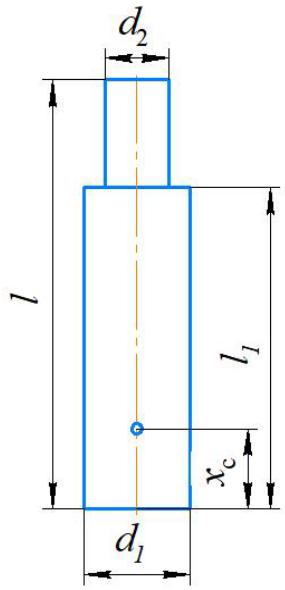


Рис. 1. Стержневая цилиндрическая ступенчатая заготовка и ее основные геометрические параметры

Вероятности p_i и p_c определяются по полученным выражениям:

$$p_i = 1 - \left\{ 1 - \left[1 - \frac{2p_б + 0{,}5\left(1 - \frac{x_c}{\sqrt{{x_c}^2 + 0{,}25d_1^4}}\right) + 0{,}5\left(1 - \frac{l - x_c}{\sqrt{(l - x_c)^2 + 0{,}25d_2^4}}\right)}{2\pi} \times \right.\right.$$

$$\left.\left. \times \left(\pi - \arccos\frac{x_c}{\sqrt{{x_c}^2 + 0{,}25d_1^4}} - \arccos\frac{l - x_c}{\sqrt{(l - x_c)^2 + 0{,}25d_2^4}} - \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. -\arccos\frac{l_1 - x_c}{\sqrt{(l_1 - x_c)^2 + 0{,}25d_1^4}} + \arccos\frac{l_1 - x_c}{\sqrt{(l_1 - x_c)^2 + 0{,}25d_2^4}} - \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. -2\arcsin\frac{\mu}{\alpha_д} \right) \right] \right\}^3 \times$$

$$\times \left[1 - \frac{p_б}{\pi}\left(\arcsin\frac{d_1 + \Delta}{\sqrt{d_1^2 + l_1^2}} - \arccos\frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + d_1^2}} \right) \right]^{\frac{\pi R \phi_{захв}}{180l}};$$

- для сплошных заготовок:

$$p_υ = 1 - υ^4 \frac{\left(2\Delta h(md_1^2 + \frac{\rho \cdot \pi}{2}[d_1^4 l_1 + d_2^4 \cdot (l - l_1)]) \right)^2}{\Delta_к^4 \left(mgd_1^2 \sin\alpha_д \right)^2};$$

- для полых заготовок:

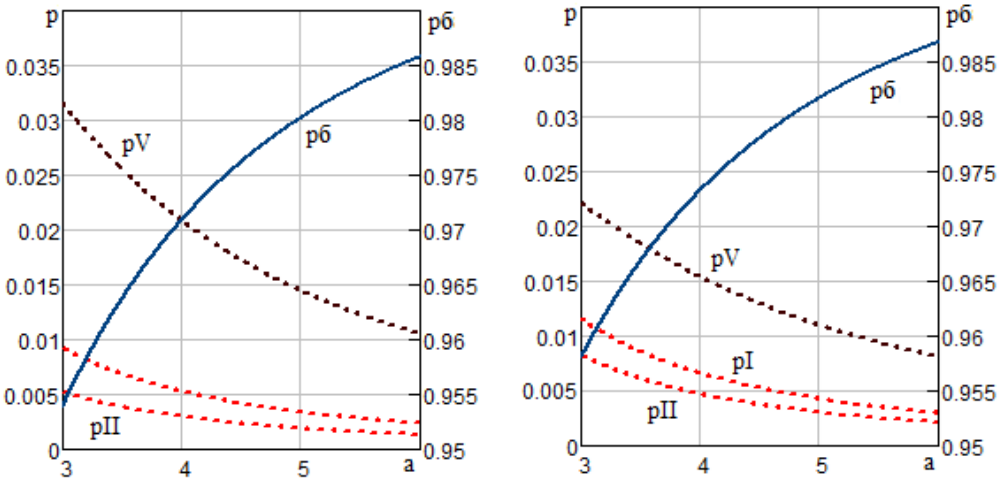
$$p_υ = 1 - υ^4 \frac{\left(8\Delta h \left[\frac{d_1^2}{4}[(d_1^2 - d_0^2)l_1 + (d_2^2 - d_0^2) \cdot (l - l_1)] + \right.\right.}{\Delta_к^4 \left([(d_1^2 - d_0^2)l_1 + (d_2^2 - d_0^2) \cdot (l - l_1)] g d_1^2 \sin\alpha_д \right)^2}$$

$$\left.\left. + \left(\frac{1}{2} l_1 \cdot \left(d_1^4 - d_0^4 \right) + \frac{1}{2}(l - l_1) \cdot \left(d_2^4 - d_0^4 \right) \right) \right] \right)^2;$$

где $\Delta_к$ – зазор между стенкой кармана и заготовкой; Δh – минимальная глубина кармана, на которую должна запасть заготовка, чтобы ее не выбросило из кармана, м (принимаем $\Delta h = \frac{d_1 - d_2}{2}$); ρ – плотность заготовки; m – масса заготовки; $\alpha_д$ – угол наклона диска БЗУ; R – радиус вращающегося диска усовершенствованного БЗУ по оси расположения тангенциальных карманов; $\phi_{захв}$ – зона расположения карманов, в которой может разместиться k заготовок.

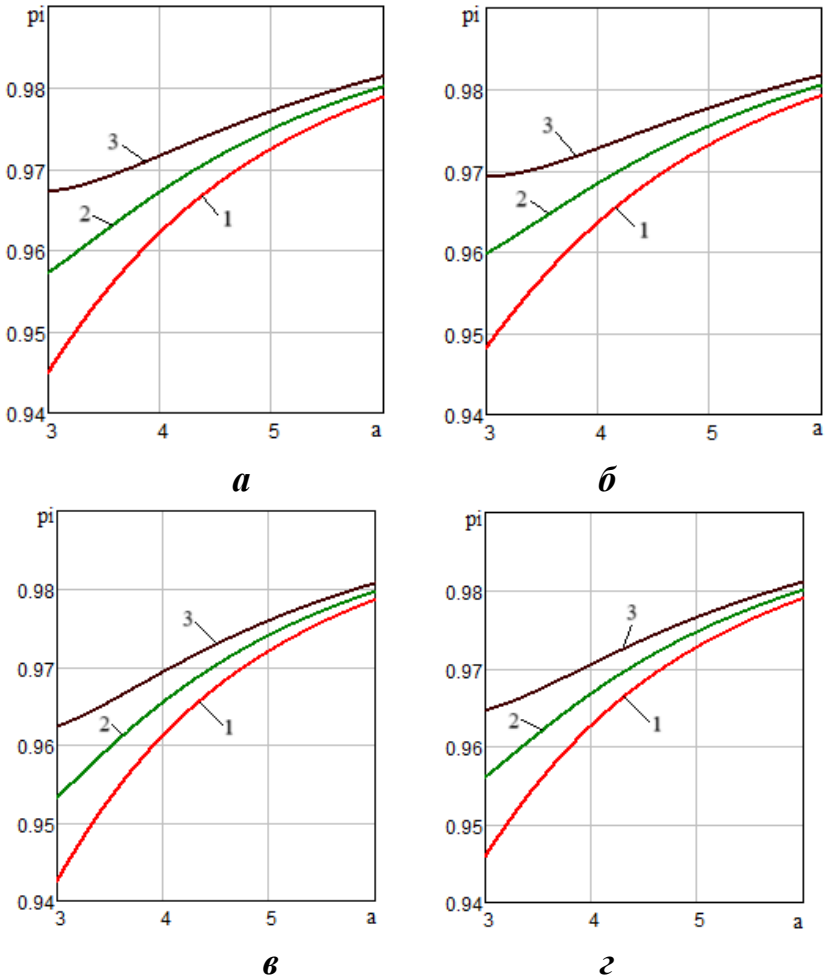
Проанализируем влияние геометрических параметров заготовок на вероятность захвата η на основе вероятностей p_i и p_c.

На рис. 2 представлены закономерности изменения вероятностей p_{I}, p_{II}, p_{V} и $p_б$ при описании вероятности p_i для заготовок с диаметрами меньшего основания $d_2 = 0{,}5d_1$ и $d_2 = 0{,}6d_1$ при $d_1 = 0{,}01$ м в зависимости от параметра $a = l/d_1$ в диапазоне от 3 до 6.



а *б*

Рис. 2. Закономерности изменения вероятностей p_{I}, p_{II}, p_{V} и $p_{\text{б}}$ ***для сплошных заготовок с*** $d_2 = 0{,}5d_1$ ***(а) и*** $d_2 = 0{,}6d_1$ ***(б)***



а *б*

в *г*

Рис. 3. Закономерности изменения вероятности p_i ***для сплошных заготовок с*** $d_2 = 0{,}5d_1$ ***(а, в) и*** $d_2 = 0{,}6d_1$ ***(б, г) при коэффициентах трения*** $\mu = 0{,}3$ ***(а, б) и*** $\mu = 0{,}4$ ***(в, г) и зазорах*** $\Delta = 0{,}1d_1$ ***(1),*** $\Delta = 0{,}2d_1$ ***(2) и*** $\Delta = 0{,}3d_1$ ***(3)***

Анализ представленных графиков показал, что чем больше соотношение $a = l/d_1$, тем больше вероятность $p_б$, но тем меньше вероятности p_I, p_{II} и p_V. При этом в диапазоне значений $a = l/d_1$ от 3 до 4 при $d_2 = 0,5d_1$ и от 3 до 3,5 при $d_2 = 0,6d_1$ наибольшую роль на вероятность $p_{i\max}$ оказывает вероятность p_V, а в диапазоне значений $a = l/d_1$ от 4 до 6 при $d_2 = 0,5d_1$ и от 3,5 до 6 при $d_2 = 0,6d_1$ – вероятность $p_б$. Кроме того, чем больше диаметр d_2, тем ниже вероятности p_I, p_{II} и p_V и тем выше вероятность $p_б$.

На рис. 3 представлены закономерности изменения вероятности p_i для заготовок с диаметрами меньшего основания $d_2 = 0,5d_1$ и $d_2 = 0,6d_1$ при $d_1 = 0,01$ м в зависимости от параметра $a = l/d_1$, угла наклона вращающегося диска $\alpha_д = 45^\circ$, его радиуса $R = 0,25$ м, при зазорах $\Delta = 0,1d_1$, $\Delta = 0,2d_1$ и $\Delta = 0,3d_1$, а также коэффициентах трения $\mu = 0,3$ и $\mu = 0,4$.

Анализ представленных на рис 3 графических зависимостей показал, что на вероятность p_i в диапазоне $a = l/d_1$ от 3 до 4,5 решающую роль оказывает величина зазора Δ и коэффициент трения μ. При дальнейшем увеличении $a = l/d_1$ влияние указанных параметров не настолько существенно.

В математическое выражение, описывающее вероятность p_c, входят наибольший d_1 и наименьший d_2 диаметры заготовки, ее полная длина l и длина l_1 той ее части, которая имеет диаметр d_1, и коэффициент трения μ_0 между заготовками. На рис. 4 представлены закономерности изменения вероятности p_c при описании вероятности захвата η для заготовок с диаметром меньшего основания $d_2 = 0,5d_1$ при $d_1 = 0,01$ м в зависимости от параметра $a = l/d_1$ в диапазоне от 3 до 6 и $\mu_0 = 0,2$, $\mu_0 = 0,3$ и $\mu_0 = 0,4$.

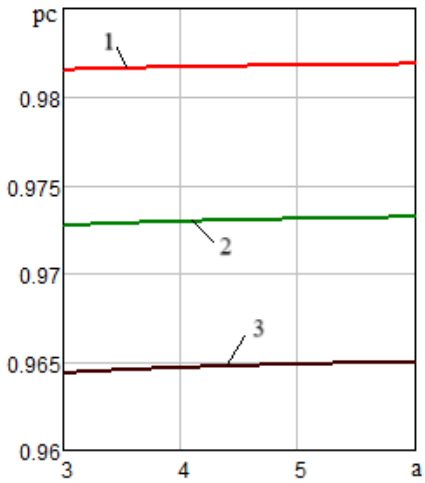
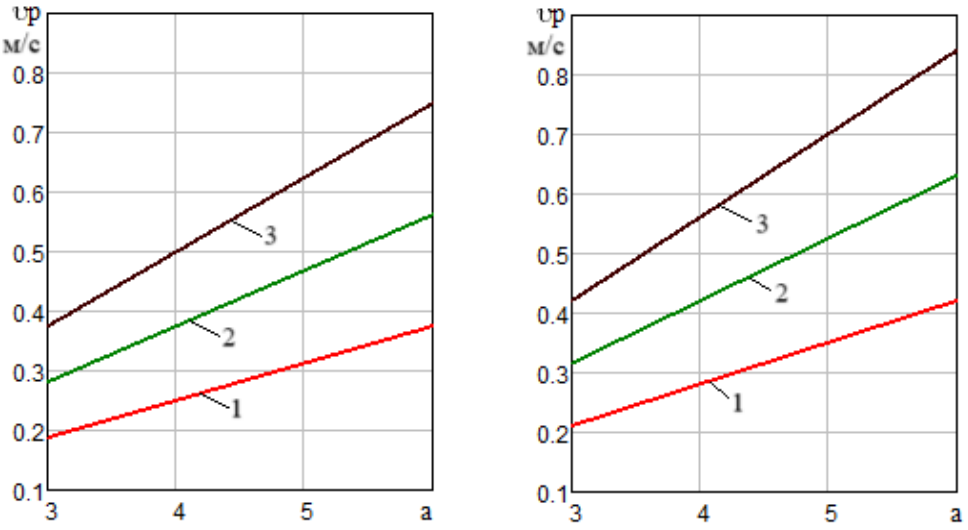


Рис. 4. Закономерности изменения вероятности p_c для заготовок с диаметром меньшего основания $d_2 = 0,5d_1$ при коэффициентах трения $\mu_0 = 0,2$ (1), $\mu_0 = 0,3$ (2) и $\mu_0 = 0,4$ (3)

Как показали исследования, диаметр d_2 не оказывает влияния на вероятность p_c и почти на всём диапазоне изменении соотношения $a = l/d_1$ вероятность p_c практически постоянна. Более выраженную роль оказывает на вероятность p_c коэффициент трения μ_0; тем не менее, его влияние составляет менее чем 1 %.

В математическое выражение, описывающее вероятность p_υ, входят наибольший d_1 и наименьший d_2 диаметры заготовки, ее полная длина l и длина l_1 той ее части, которая имеет диаметр d_1, плотность заготовки ρ, угол наклона вращающегося диска $\alpha_д$, а также зазор $\Delta_к$ и окружная скорость захватывающих органов υ. На рис. 5 представлены закономерности изменения предельной скорости $\upsilon_{пред}$ при описании вероятности p_υ для заготовок с диаметрами меньшего основания $d_2 = 0{,}5d_1$ и $d_2 = 0{,}6d_1$ при $d_1 = 0{,}01$ м в зависимости от параметра $a = l/d_1$ в диапазоне от 3 до 6 при зазорах $\Delta_к = 0{,}1l$, $\Delta_к = 0{,}15l$ и $\Delta_к = 0{,}2l$. На предельную скорость оказывает влияние и соотношение $a = l/d_1$, и зазор $\Delta_к$, и диаметр меньшего основания d_2; при этом первый и второй из перечисленных параметров наиболее существенное – при их увеличении происходит и увеличение $\upsilon_{пред}$.

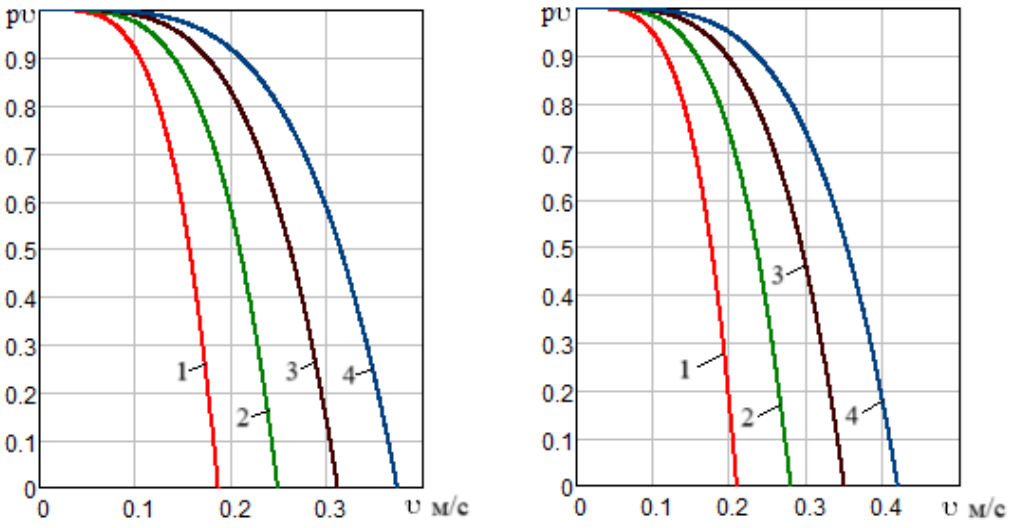


а ***б***

Рис. 5. Закономерности изменения предельной скорости $\upsilon_{пред}$ ***для сплошных заготовок с*** $d_2 = 0{,}5d_1$ ***(а) и*** $d_2 = 0{,}6d_1$ ***(б) при зазорах*** $\Delta_к = 0{,}1l$ ***(1),*** $\Delta_к = 0{,}15l$ ***(2) и*** $\Delta_к = 0{,}2l$ ***(3) в зависимости от окружной скорости*** υ

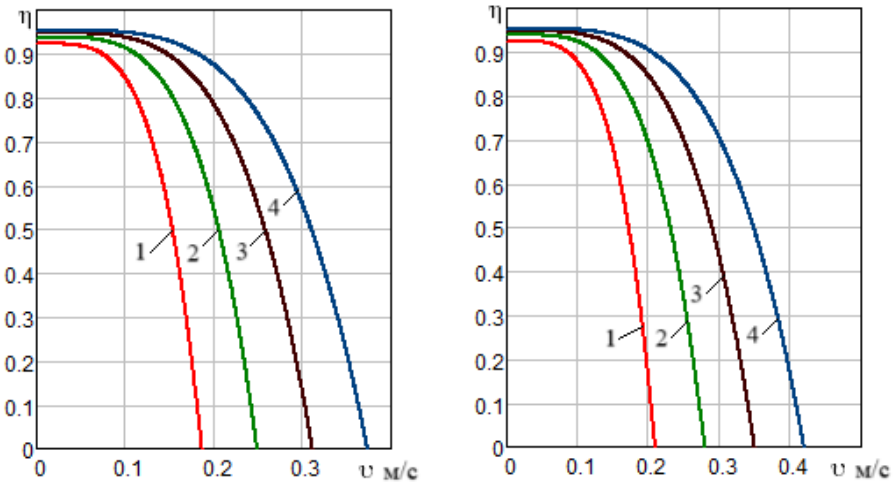
Для общей оценки влияния перечисленных параметров на вероятность p_υ представлены графики на рис. 6. Они позволяют визуализировать влияние на вероятность p_υ диаметров заготовок меньшего основания

$d_2 = 0{,}5d_1$ и $d_2 = 0{,}6d_1$ при $d_1 = 0{,}01$ м, параметра $a = l/d_1 = 3$, $a = l/d_1 = 4$, $a = l/d_1 = 5$ и $a = l/d_1 = 6$ при зазоре $\Delta_к = 0{,}1l$ в зависимости от фактической окружной скорости υ органов захвата.



а ***б***

Рис. 6. Закономерности изменения вероятности p_υ ***для сплошных заготовок с*** $d_2 = 0{,}5d_1$ ***(а) и*** $d_2 = 0{,}6d_1$ ***(б) при*** $\Delta_к = 0{,}1l$ ***и*** $a = l/d_1 = 3$ ***(1),*** $a = l/d_1 = 4$ ***(2),*** $a = l/d_1 = 5$ ***(3) и*** $a = l/d_1 = 6$ ***(4)***



а ***б***

Рис. 7. Закономерности изменения вероятности захвата η ***для сплошных заготовок с диаметрами*** $d_2 = 0{,}5d_1$ ***(а) и*** $d_2 = 0{,}6d_1$ ***(б) при*** $\Delta_к = 0{,}1l$ ***и*** $a = l/d_1 = 3$ ***(1),*** $a = l/d_1 = 4$ ***(2),*** $a = l/d_1 = 5$ ***(3) и*** $a = l/d_1 = 6$ ***(4)***

На вероятность p_υ важную роль оказывают все перечисленные параметры, но наиболее существенное влияние имеет окружная скорость. При

этом при ее значениях от 0 до 0,1 м/с вероятность p_υ принимает сначала значения от 1 до 0,95 в зависимости от соотношения $a = l/d_1$, диаметра меньшего основания d_2, а затем начинает резко снижаться до нуля, что обусловлено повышением окружной скорости υ органов захвата и отсутствием возможности при таких скоростях заготовке запасть в карман.

На рис. 7 представлены сводные графики вероятности захвата ступенчатых цилиндрических сплошных заготовок в зависимости от диаметров заготовок меньшего основания $d_2 = 0,5d_1$ и $d_2 = 0,6d_1$ при $d_1 = 0,01$ м, параметра $a = l/d_1 = 3$, $a = l/d_1 = 4$, $a = l/d_1 = 5$ и $a = l/d_1 = 6$ при зазоре $\Delta_к = 0,1l$ в зависимости от фактической окружной скорости υ тангенциальных карманов БЗУ.

Теоретическое исследование вероятности захвата η показало, что важную роль на захват заготовок оказывают все перечисленные параметры, а степень их влияния можно оценить с помощью представленных графиков. Указанные параметры также оказывают влияние на производительность БЗУ, в котором захват осуществляется тангенциально расположенными по поверхности наклонного вращающегося диска карманами, а активное ориентирование осуществляется с помощью выступов, расположенных по диском БЗУ.

Список литературы

1. Пантюхина Е.В. Методология комплексного подхода для оценки производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств/ Материалы IV Международной научно-технической конференции в г. Омск; науч. ред. П.Д. Балакин. 2020. С. 380–388.

2. Васин С.А., Пантюхина Е.В. Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2023. № 3. С. 64–88.

3. Pantyukhina E.V. Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1546 (2020) 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012024.

4. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Теоретические основы проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-1. С. 10-20.

5. Медвидь М.В. Автоматические ориентирующие загрузочные устройства. М.: Машгиз, 1963. 299 с.

6. Голубенко В.В., Давыдова Е.В., Токарев В.Ю. Экспериментальные исследования производительности дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: материалы Международной научно-технической конференции «АПИР–16»: в 2 ч. 2011. С. 39–43.

7. Пузиков И.В., Пантюхина Е.В. Экспериментальные исследования производительности вертикального бункерного загрузочного устройства с роликами // В сборнике: Автоматизация: проблемы, идеи, решения. сборник научных трудов национальной научно-технической конференции с международным участием «АПИР-24». Тула, 2019. С. 43-46.

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

9. Васин С.А., Шевченко С.Н., Пантюхина Е.В., Лукин С.А. Теоретическое и экспериментальное исследование производительности зубчатого бункерного загрузочно-ориентирующего устройства для асимметричных деталей тел вращения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. № 1 (117). С. 63-69.

10. Пантюхина Е.В., Прейс В.В. Верификация теоретического подхода к математическому моделированию производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2022. № 1 (76). С. 73-79.

11. Пантюхина Е.В., Васин С.А., Шевченко С.Н., Маликов А.А. Верификация концепции построения математических моделей вероятности захвата для описания производительности механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. № 2 (118). С. 55-62.

12. Лукин С.А., Пантюхина Е.В., Пузиков И.В. Экспериментальные исследования производительности бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 16-21.

13. Пантюхина Е.В., Борисов А.А., Васин С.А., Клентак А.С. Математическое описание вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 466-476.

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

THEORETICAL STUDY OF PROBABILITY OF ROD STEPPED BLANKS GRIPPING IN HOPPER FEEDING-ORIENTING DEVICE WITH INCLINED DISK AND TANGENTIAL POCKETS

A.A. Borisov

The article presents the results of a theoretical study of the probability of gripping of rod stepped workpieces in a hopper feeding-orienting device with an inclined disk and tangential pockets and the degree of influence on the probability of gripping of various parameters of the device and workpieces, at which its maximum values will be provided.

Key words: probability of gripping blanks, automatic feeding, orientation of stepped blanks, hopper feeding-orienting device.

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

УДК 621.52.011
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-539-540

ЗАГРУЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

И.В. Надеждин

В статье приведены результаты исследований динамических характеристик загрузочных устройств с рекуперацией энергии, включающих циклоидальные механизмы, на основе математического моделирования с учетом упругих свойств привода и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: автоматизированные системы; циклоидальные загрузочные устройства; рекуперативный привод; динамика; математическое моделирование, производительность.

Эффективность работы автоматизированных систем во многом определяется быстродействием загрузочного оборудования, предназначенного для подачи ориентированных деталей непосредственно в зону выполнения технологической сборочной операции. К ним относятся: питатели: револьверные, шиберные, грейферные, комбинированные, манипуляторы [1]. Способы увеличения быстродействия манипуляторов в автоматизированных сборочных производствах изложены в [2-6]. Оптимальную конструкцию привода загрузочного оборудования выбирают с учетом обеспечения в первую очередь выполнения операции загрузки-выгрузки или межоперационного транспортирования сборочных деталей за минимально возможное время, что определяет повышенные требования к приводам с точки зрения динамики реализуемых законов движения. В первую очередь законы движения должны обеспечивать плавность движения подающего устройства, отсутствие скачков скорости и ускорения, приводящих к ударам и значительным возрастаниям усилий, действующих на механизмы, а, следовательно, быстрому износу и потере точности позиционирования.

Традиционно привод загрузочного устройства с колебательным движением исполнительного звена выполняют по известной схеме (рис. 1, *а*). Мощность приводного двигателя 1 выбирают исходя из инерционных характеристик подвижных масс 2 и требуемого быстродействия. В подобных устройствах в крайних положениях звена устанавливают регулируемые упоры 3, оснащенные демпфирующими устройствами 4. Вся энергия, которую получила система от приводного двигателя на всем ходе движения,

рассеивается демпфирующими устройствами уже на относительно малом участке перемещения. И чем выше быстродействие загрузочного устройства, тем мощнее должны быть демпферы и больше ускорения элементов системы.

Движение такого устройства описывается уравнением

$$mR^2\ddot{q} = M_{\text{дв}} + M_{\text{дем}}(\dot{q}) + M_{\text{тр}}, \qquad (1)$$

где m – масса подвижного звена; R – радиус расположения массы; $\dot{q}, \ddot{q}$ – первая и вторая производные от обобщенной координаты q; $M_{\text{дв}}$, $M_{\text{дем}}$, $M_{\text{тр}}$ – моменты двигателя, демпфера и трения в передачах и опорах.

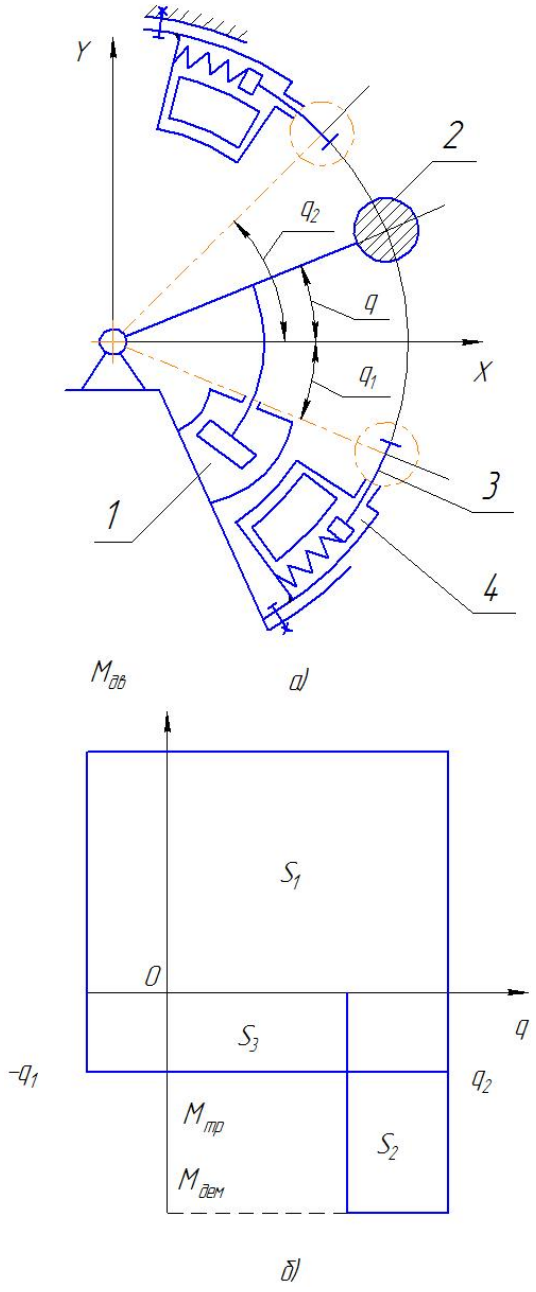


Рис. 1. Схема привода загрузочного устройства с колебательным движением исполнительного звена (а) и циклограмма работы системы (б)

Циклограмма работы устройства и график изменения моментов $M_{дв}$ и $M_{тр}$ показан на рис.1, *б*. Анализ движений загрузочного устройства показывает, что работа двигателя равна работе моментов сил трения и демпфирования, т. е. на полном цикле движения справедливо $S_1 = S_2 + S_3$. Таким образом, увеличение быстродействия за счет повышения $M_{дв}$ значительно быстрее вызывает увеличение требуемого момента $M_{дем}$, вследствие того, что он действует на существенно меньшем участке перемещения.

При этом в соответствие с уравнением (1) возрастают и ускорения, а, следовательно, и нагрузки в системе на участке торможения. Но главным здесь является то, что повышать быстродействие загрузочного устройства за счет увеличения мощности приводного двигателя можно лишь до определенного, довольно низкого предела, так как всегда необходимо учитывать массогабаритные показатели привода и пределы потребляемой мощности. Следовательно, критерий максимума быстродействия загрузочного устройства за счет увеличения мощности привода без учета дополнительных ограничений, приводит к выбору двигателя с бесконечно большой мощностью, что, естественно, не имеет практического смысла.

Одним из наиболее эффективных способов повышения быстродействия автоматических загрузочных устройств с возвратно-поступательным или колебательным движением исполнительного звена предлагается в качестве движителя использовать пружины растяжения-сжатия, реализуя тем самым принцип рекуперации энергии, а кинематическую связь привода с рабочим органом осуществить с помощью циклоидального зубчатого механизма [7, 8]. Расчетная схема привода загрузочного устройства с рекуперацией энергии приведена на рис. 2.

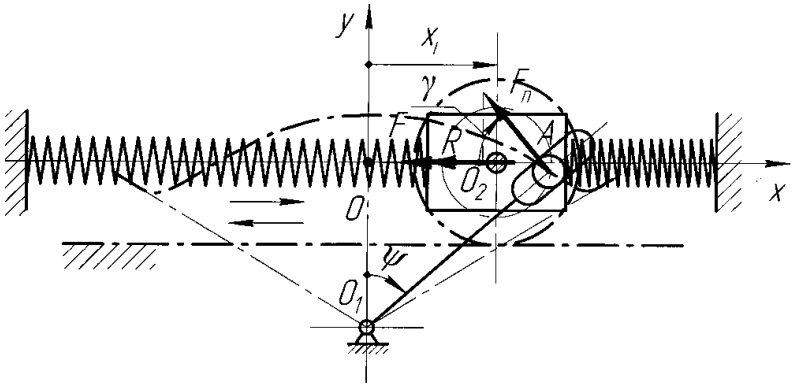


Рис. 2. Расчетная схема рекуперативного привода загрузочного устройства с колебательным движением исполнительного звена на основе циклоидального зубчатого механизма

Уравнение движения ведомого звена рассматриваемого механизма имеет вид

$$I_{пр}\ddot{\psi} = M_{дв} + M_c(\dot{\psi}) + M_{тр}, \qquad (2)$$

где $I_{пр}$ – приведенный момент инерции ведомых масс, $M_{дв}$ – движущий момент; M_c – момент сил сопротивления, пропорционален скорости.

Движущий момент, создаваемый пружинным приводом

$$M_{\text{дв}} = Fr_{к} = -cxr_{к},$$

где F – движущая сила, $r_{\text{к}}$ – радиус зубчатого колеса; c – суммарная жесткость пружин, x – деформация пружины. Пружины имеют одинаковую жесткость c, причем жесткость каждой пружины будет $c/2$.

Дифференциальное уравнение движения ведущего звена с учетом действующих сил: движущей силы F, силы сопротивления R и возмущающей силы $P = F_n \cos\gamma$ (см. рис. 2) будет иметь вид

$$m\ddot{x} = -cx - \alpha\dot{x} + F_n \cos\gamma, \qquad (3)$$

где m – приведенная масса, x – обобщенная координата; $\dot{x}$, $\ddot{x}$ – первая и вторая производные от обобщенной координаты, α – коэффициент пропорциональности; F_n – сила нормального давления на стенку паза ведомого звена: $F_n = M_{2\Sigma}/l_{\text{к}}$, $M_{2\Sigma}$ – суммарный вращающий момент на валу ведомого звена; $l_{\text{к}} = O_1A$ – расстояние от центра вращения ведомого звена до центра цевки; γ –угол между направлением силы F_n и осью размещения пружин.

Формула для $l_к$ в безразмерном виде имеет вид [4]

$$l_{\text{к}} / r_{\text{к}} = \sqrt{\rho^2 + 2\rho\left(\lambda_2 \cos\varphi + \varphi\sin\varphi\right) + \left(\varphi^2 + \lambda_2^2\right)},$$

где $\rho = d / r_{\text{к}}$; $\lambda_2 = \left[\rho\left(\pi + \arccos\rho\right)\right]/\sqrt{1-\rho^2}$; d – расстояние от центра A до центра O_2 зубчатого колеса; φ – угол, определяющий положение цевки в процессе поворота зубчатого колеса.

Разделив обе части уравнения (3) на m и введя обозначения: $c/m = k^2$; $\alpha/m = 2n$; $F_n\cos\gamma/m = \Omega$, после преобразований получим следующее дифференциальное уравнение движения ведущего звена

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2 x = \Omega \qquad (4)$$

Общее решение однородного уравнения (4), а именно, его левой части имеет следующий вид

$$x = e^{-nt}\left(C_1 \cos\sqrt{k^2 - n^2}\,t + C_2 \sin\sqrt{k^2 - n^2}\,t\right),$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

При циклоидальном законе движения ведомого звена точка A центра цевки описывает укороченную циклоиду (рис. 2) с координатами:

$$x/r = \varphi + \sin\varphi; \quad y/r = \lambda_2 + \rho\cos\varphi. \qquad (5)$$

Условие безударной работы циклоидального механизма определяется уравнениями [4]:

$$\left.\begin{aligned} \dot{y}/\dot{x} = -\rho\sin\varphi/\left(1+\rho\cos\varphi\right) = ctg\psi_0; \\ \ddot{y}/\ddot{x} = ctg\varphi = ctg\psi_0, \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

где $\dot{X}$, $\ddot{X}$, $\dot{Y}$, $\ddot{Y}$ – соответственно первая и вторая производные по углу φ от координат x и y:

$$\dot{x} = r\left(1+\rho\cos\varphi\right); \quad \ddot{x} = \dot{y} = -r\rho\sin\varphi; \quad \ddot{y} = -r\rho\cos\varphi; \quad \psi_0 = \psi_\Sigma / 2.$$

Из второго уравнения (6) найдем значения аргумента, соответствующие точкам перегиба $\varphi_{\text{тп1,2}}$ циклоиды: $\varphi_{\text{тп1,2}} = \psi_0 + \pi$.

Для определения закона движения ведущего звена с учетом упругих свойств пружин растяжения-сжатия частное решение неоднородного уравнения (4) будем искать в следующем виде

$$x = D\sin(pt + \xi). \tag{7}$$

Можно подобрать такие постоянные D и ζ, при которых выражение (7) будет удовлетворять уравнению (4).

Найдем производные от координаты x по времени t:

$$\dot{x} = dx/dt = Dp\cos(pt + \xi); \quad \ddot{x} = d^2x/dt^2 = -Dp^2\sin(pt + \xi) \tag{8}$$

Подставим в уравнение (4) выражения для $\dot{x}, \ddot{x}$

$$-Dp^2\sin(pt + \xi) + 2nDp\cos(pt + \xi) + k^2D\sin(pt + \xi) = \Omega. \tag{9}$$

Из уравнения (9) можно найти выражения для постоянных D и ζ:

$$D = \frac{\Omega}{\sqrt{\left(k^2 - p^2\right)^2 + 4n^2p^2}}; \quad \xi = arctg\frac{2np}{k^2 - p^2}.$$

Тогда общее выражение для обобщенной координаты x ведущей каретки получим в виде

$$x = e^{-nt}(C_1\cos\sqrt{k^2 - n^2}t + C_2\sin\sqrt{k^2 - n^2}t) + \frac{\Omega\sin\left(pt + \xi\right)}{\sqrt{\left(k^2 - p^2\right)^2 + 4n^2p^2}}, \tag{10}$$

Выражения для скорости $\dot{x}$ и ускорения $\ddot{x}$ ведущего звена можно получить соответствующим дифференцированием (10). Однако это приводит к сложным и громоздким выражениям. Для этого более удобно применять методы моделирования. Решение дифференциальных уравнений осуществлялось с помощью системы моделирования динамических систем *Simulink* [11].

Закон движения ведомого звена циклоидального механизма при равномерном движении ведущего зубчатого колеса (ω_1 = const) характеризуется следующими зависимостями [4]:

$$\left.\begin{aligned} \omega_i &= \frac{d\psi}{d\varphi} = \frac{\dot{x}y - x\dot{y}}{x^2 + y^2}; \\ \varepsilon_i &= \frac{d^2\psi}{d\varphi^2} = \frac{\left(\ddot{x}y - x\ddot{y}\right) - 2\omega_i\left(x\dot{x} + y\dot{y}\right)}{x^2 + y^2}; \\ j_i &= \frac{d^3\psi}{d\varphi^3} = \frac{\dddot{x}y + \ddot{x}\dot{y} - \ddot{y}x - \dddot{y}\dot{x} - 4\varepsilon_i\left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + x\ddot{x} - y\ddot{y}\right)}{x^2 + y^2} \end{aligned}\right\},$$

где $\ddot{x} = -r\rho\cos\varphi$; $\ddot{y} = r\rho\sin\varphi$; x и y определяют по формулам (5); ω_i, ε_i, j_i – инварианты подобия угловой скорости, углового ускорения и пульса соответственно.

Переход от инвариантов подобия к действительным значениям угловой скорости ω, углового ускорения ε и пульса j ведомого звена при ω_1= *const* осуществляется по формулам:

$$\omega = \omega_i\cdot\omega_1; \quad \varepsilon = \varepsilon_i\cdot\omega_1^2; \quad j = j_i\cdot\omega_1^3$$

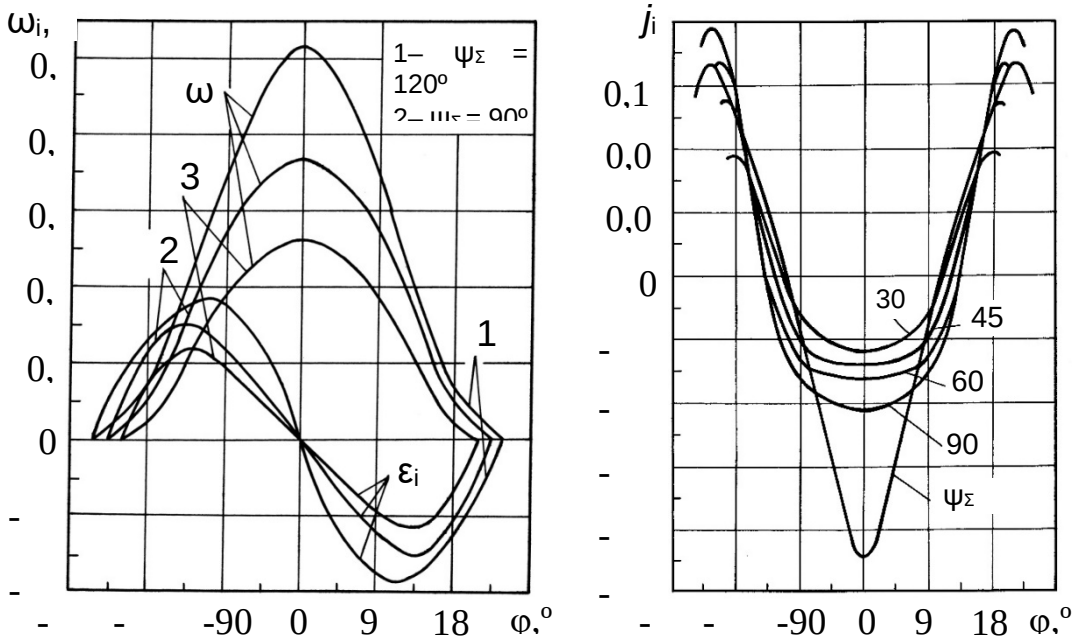
где $\omega_1 = \dot{\varphi} = v_1 / r$ – угловая скорость зубчатого колеса с цевкой; v_1 – линейная скорость каретки.

При $\omega_1 \neq const$ выражения для ω, ε и j будут иметь вид:

$$\omega = \omega_i \cdot \dot{\varphi}; \varepsilon = \varepsilon_i \cdot \dot{\varphi}^2 + \omega_i \cdot \ddot{\varphi}; \quad j = j_i \cdot \dot{\varphi}^3 + 3\varepsilon_i \cdot \dot{\varphi}\ddot{\varphi} + \omega_i \cdot \dddot{\varphi},$$

где $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$, $\dddot{\varphi}$ – соответственно первая, вторая и третья производные по обобщенной координате φ угла поворота ведущего зубчатого колеса.

Характер изменения кривых ω_i, ε_i и j_i для некоторых значений угла поворота исполнительного звена загрузочных устройств ψ_Σ = 45º, 60°, 90° и 120° с ***циклоидальными механизмами показан на рис. 3.***



а) *б)*

Рис. 3. Графики инвариантов подобия угловой скорости ω_i, ускорения ε_i (а) и пульса j_i (б) исполнительного звена загрузочного устройства

Для проверки точности моделирования динамики загрузочного устройства с рекуперацией энергии были проведены экспериментальные исследования. Общий вид и кинематическая схема испытательного устройства приведена на рис. 4.

Загрузочное устройство содержит привод 1 с пружинами растяжения-сжатия равной жесткости, на штоке которого закреплено зубчатое колесо 2 с диском 3 и цевкой 4, зубчатую рейку 5 и ведомую кулису 6 с радиальным пазом, жестко связанную с колонной 7 загрузочного устройства. На колонне закреплено исполнительное звено 8.

Фиксация загрузочного устройства осуществляется одним из двух способов: кинематически с поджатием колонны с помощью кронштейна 11 к жестким регулируемым упорам 12 и 13, либо шариковым фиксатором 9, входящим в паз сухаря 10 на колонне 7.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с применением стандартной аппаратуры ВИ6–6ТН для преобразования и записи параметров. В процессе экспериментальных исследований определялись исходные данные, необходимые для моделирования динамики загрузочного устройства, изучались динамические параметры поворота и точность позиционирования для оценки технических характеристик устройства с учетом изменения нагрузки и времени поворота при заданной жесткости пружин.

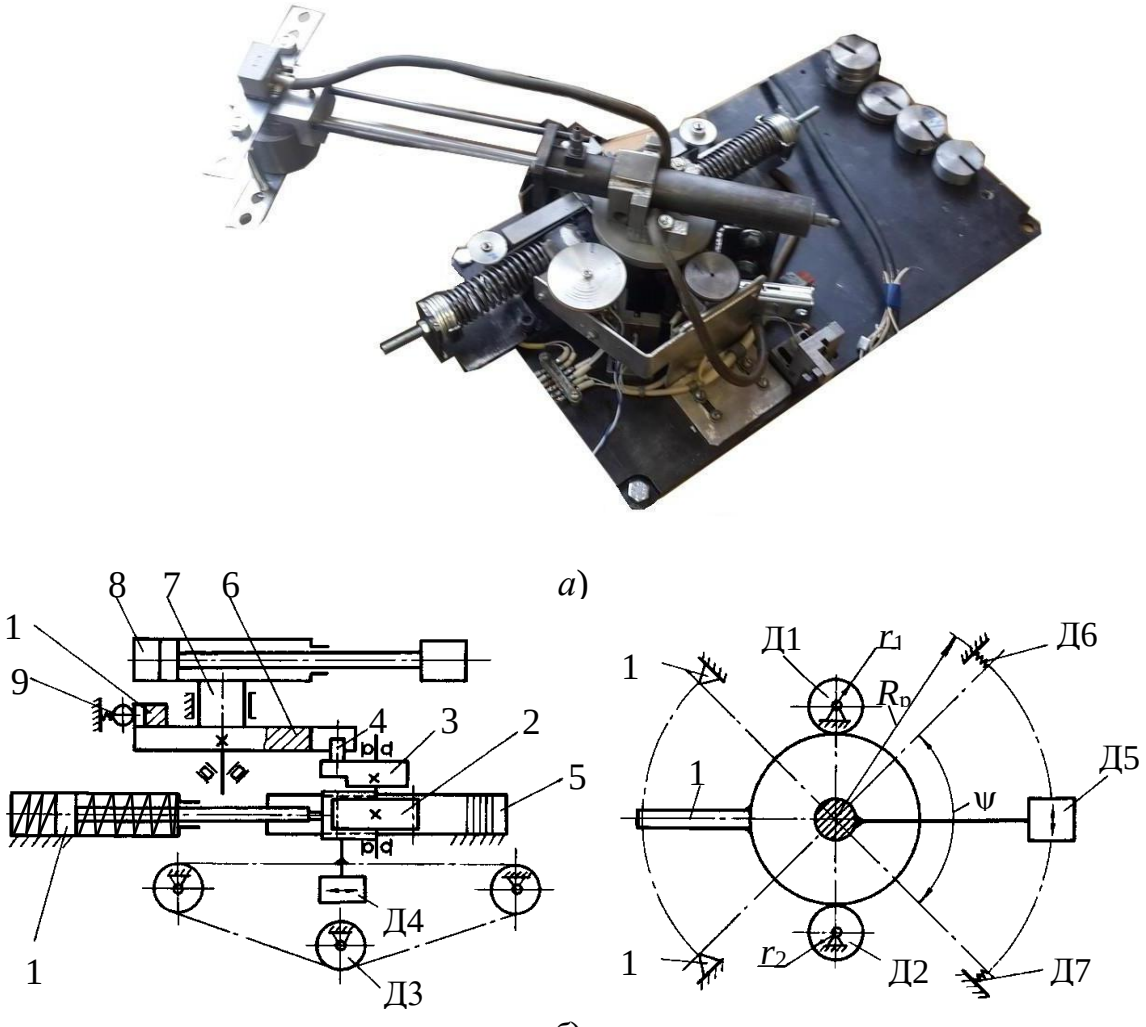


Рис. 4. Общий вид (а) и кинематическая схема экспериментальной установки (б): 1 – привод с пружинами растяжения-сжатия; 2 – зубчатое колесо; 3 – диск; 4 – цевка; 5 – рейка; 6 – кулиса; 7 – поворотная платформа; 8 – исполнительное звено; 9, 10 – фиксирующее устройство; 11 – рычаг; 12, 13 – регулируемые упоры; Д1-Д7 – датчики для измерения динамических параметров

Места установки датчиков Д1 – Д7 для записи регистрируемых параметров и их обозначения показаны на рис. 4; характеристики используемых датчиков приведены в табл. 1.

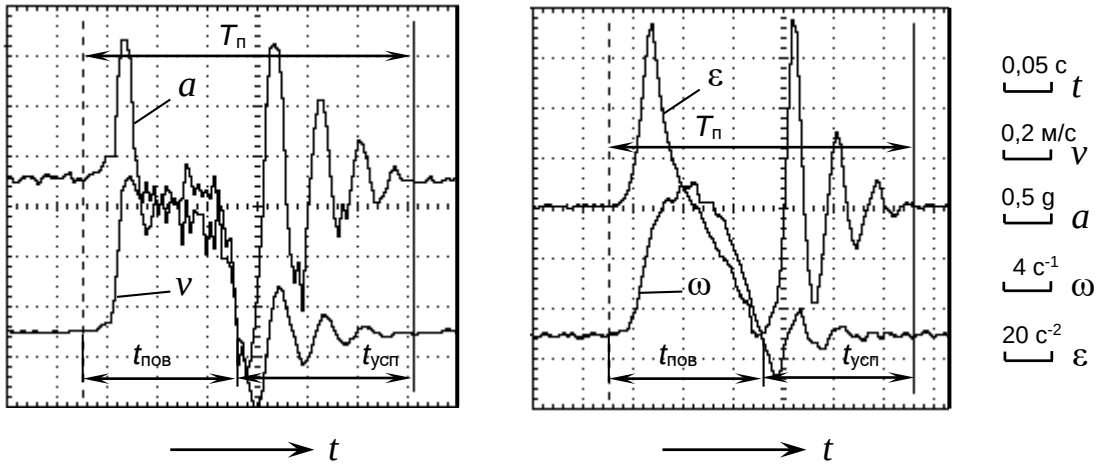
Таблица 1

Характеристики используемых датчиков

Обозначение датчика	Тип и характеристика датчика	Измеряемый параметр
Д1	Потенциометр ПТП-1.	Угол поворота исполнительного звена загрузочного устройства
Д2, Д3	Тахогенератор ТГП-3А.	Угловая скорость исполнительного звена. Линейная скорость *v* каретки
Д4, Д5	Датчик ускорения ДУ-5С инерционного типа, частотный диапазон 0-200 Гц	Линейное ускорение каретки. Угловое ускорение исполнительного звена
Д6, Д7	Тензометрические датчики 2ПКБ-20-200, наклеенные на упругую балку по полумостовой схеме	Колебания исполнительного звена в точках позиционирования

Сигналы с датчиков измерения угла поворота Д1, датчиков скоростей Д2 и Д3 регистрировались с помощью цифрового осциллографа EZ DS-1250C; с датчиков ускорений Д4 и Д5 –испытательной аппаратурой ВИ6–6ТН и осциллографом EZ DS-1250C. Датчики Д6 и Д7, построенные на основе тензометрического чувствительного элемента, работали совместно с тензоусилителем. Первичная обработка регистрируемых параметров и построение соответствующих графиков осуществлялась с помощью программного обеспечения *LabVIEW* и известных математико-статистических методов.

На рис.5 приведена типовая осциллограмма динамических параметров загрузочного устройства с рекуперацией энергии.



а) *б*)

Рис. 5. Осциллограммы динамических параметров зубчато-цевочного циклоидального механизма с рекуперацией энергии: а – ведущее звено; б – ведомое звено

Цикл поворота устройства имеет ярко выраженные участки разгона, торможения и успокоения колебаний. Первый этап – разгон, характеризуется плавным нарастанием угловой скорости ω_{max} от 0 до 10,5$с^{-1}$ и положительным максимальным значением углового ускорения $\varepsilon_{max}^{(р)} = 72с^{-2}$. Второй этап – плавное торможение движущихся масс, при этом угловая

скорость колонны убывает до нуля, а максимальное угловое ускорение торможения $\left|\varepsilon_{\max}^{(т)}\right| = 50c^{-2}$ имеет отрицательное значение. Каретка ведущего звена доходит до упора и фиксируется с конечной скоростью, о чем свидетельствует характер изменения кривых скорости *v* и ускорения *a* (рис. 5, *а*). В крайней точке позиционирования, соответствующей времени движения каретки *t* = 0,18 с, происходит останов загрузочного устройства. Вследствие упругости ведомого звена наблюдаются быстро затухающие колебания с незначительной амплитудой. Конец времени успокоения колебаний $t_{усп}$ определяется уровнем колебаний, равным половине допускаемой погрешности повторяемости при угловом позиционировании. Рассмотренная выше осциллограмма получена при ψ_Σ = 1,57 рад, I_n = 0,025 кг·м^2, H = 0,09 м, $m_{гр}$ = 0,15 кг, $c_1 = c_2$ = 0,3 Н/мм, Δl = 0,1 мм.

Для сравнительного анализа динамики загрузочных устройств воспользуемся критериями качества, нашедшими применение в практике экспериментальных исследований машин-автоматов [9]. В табл. 2 приведены данные обработки осциллограммы, показанной на рис.5. Там же приведены результаты экспериментов при изменении массы перемещаемых заготовок $m_{заг}$ = 0,2; 0,45; 0,7 кг. Общее время углового позиционирования $T_п$, время поворота $t_{пов}$, средние угловые скорости $\omega_{ср0} = \psi_\Sigma / t_{пов}$ и $\omega_{ср} = \psi_\Sigma / T_п$, коэффициент потерь времени на успокоение колебаний в точке позиционирования исполнительного звена $\eta_{усп} = t_{усп} / T_п$ определяли по методике, разработанной в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН [10].

Во второй части табл. 2 приведены простые и комплексные показатели, рассчитанные по результатам экспериментов. К простым показателям относятся:

коэффициенты заполнения тахограмм O_ω и $O_{\omega 1}$:

$$O_\omega = \omega_{ср} / \omega_{\max}; \quad O_{\omega 1} = \omega_{ср} / \omega_{ср0};$$

коэффициент, характеризующий отношение максимальных угловых ускорений при разгоне и торможении O_ε

$$O_\varepsilon = \varepsilon_{\max}^{(т)} / \varepsilon_{\max}^{(р)}.$$

коэффициенты динамичности $K_д$ и $K_д^*$:

$$K_д = \varepsilon_{\max}^{(р)} / \omega_{ср0}^2; \quad K_д^* = \varepsilon_{\max}^{(т)} / \omega_{ср0}^2;$$

коэффициенты быстроходности K_0 и K и их безразмерные аналоги $K_0 / K_б, K / K_б$:

$$K_0 = \omega_{ср0} \cdot \sqrt[3]{I_п}; \quad K = \omega_{ср} \cdot \sqrt[3]{I_п}.$$

где $K_б$ =2,14 – базовое значение коэффициента быстроходности при переходе к безразмерным величинам [10].

Комплексные показатели, характеризующие зависимость быстроходности механизмов от точности углового позиционирования $\Delta\psi$ (угловые секунды), угла поворота ψ_Σ (радиан) и момента инерции $I_п$ (кг·м^2) перемещаемых заготовок:

$$A_{д} = K_{д}\Delta\psi\left(K_0\right)^{1/3};\quad A_{кд} = \left(A_{\omega}\right)^{1/3} / A_{д};\quad A_{\omega} = K\left(\psi_{\Sigma}\right)^{-1/2}\left(\Delta\psi\right)^{-1/4}.$$

Группа интегральных показателей $A_{д}, A_{\omega}, A_{кд}$ (или их безразмерные аналоги $A_{\omega} / A_{\omega б}, A_{д} / A_{дб}$, где $A_{\omega б} = 2{,}14;\ A_{дб} = 1{,}27$ – масштабы измерений) наиболее полно характеризует динамику исполнительных механизмов загрузочных устройств сборочных машин-автоматов и мехатронных систем.

Таблица 1

Комплексные показатели качества загрузочного устройства с рекуперацией энергии при изменении массы перемещаемых заготовок

m, кг	$t_{р}$, с	$t_{т}$, с	$t_{усп}$, с	$t_{пов}$, с	$T_{п}$, с	$\eta_{усп}$	$\omega_{ср0}$, с$^{-1}$	$\omega_{ср}$, с$^{-1}$	ω_{max}, с$^{-1}$	$\varepsilon^{(р)}_{max}$, с$^{-2}$	$\varepsilon^{(т)}_{max}$, с$^{-2}$
0	0,08	0,08	0,17	0,16	0,33	0,51	9,81	4,76	36,0	656	529
0,2	0,15	0,14	0,31	0,29	0,60	0,52	5,41	2,62	19,6	303	210
0,45	0,16	0,17	0,38	0,33	0,71	0,54	4,76	2,21	17,1	202	128
0,70	0,18	0,21	0,37	0,39	0,76	0,52	3,92	2,04	13,5	124	73

m, кг	O_{ω}	$O_{\omega 1}$	O_{ε}	$K_{д}$	$K^{*}_{д}$	$K_0 / K_{б}$	$K / K_{б}$	$A_{\omega} / A_{\omega б}$	$A_{д} / A_{дб}$	$A_{кд} \times 10^3$
0	0,13	0,48	0,81	6,82	5,50	1,34	0,65	0,19	554	1,03
0,2	0,13	0,47	0,69	10,3	7,17	0,74	0,36	0,10	512	1,17
0,45	0,13	0,46	0,63	8,9	5,65	0,65	0,30	0,09	469	1,23
0,70	0,15	0,52	0,59	8,1	4,75	0,53	0,28	0,08	395	1,40

Кроме известных величин в верхней части табл. 2 использовались следующие обозначения: m – масса перемещаемого груза; ω_{max}, $\varepsilon^{(р)}_{max}$, $\varepsilon^{(т)}_{max}$ – максимальные угловая скорость; угловые ускорения исполнительного звена соответственно при разгоне и торможении.

Из осциллограммы (рис. 5) и анализа табл.2 видно, что с увеличением массы перемещаемых заготовок время разгона и торможения увеличивается. Общее время позиционирования $T_{п}$ увеличивается от 0,33до 0,76 с. С увеличением времени торможения снижается отношение значения ускорения $\varepsilon^{(т)}_{max}$ к значению ускорения разгона ε^{P}_{max}. Средняя угловая скорость $\omega_{ср}$ с увеличением массы заготовок уменьшается в 2,27 раза за счет общего снижения динамичности привода. На осциллограмме (рис. 5) общее время поворота $T_{п}$ = 0,33 с; при этом потери времени на успокоение колебаний в конце поворота руки $t_{усп}$ = 0,17 с, что составляет приблизительно 51% от общего времени $T_{п}$. При этом средняя угловая скорость равна $\omega_{ср} = 4{,}76\,c^{-1}$. Без учета этих потерь средняя угловая скорость $\omega_{ср0}$ загрузочного устройства будет равна $\omega_{ср0} = 9{,}81\,c^{-1}$.

Следует отметить, что полученное среднее значение $\omega_{ср} = 4{,}76\,c^{-1}$ для рекуперативных приводов с циклоидальными механизмами не является предельным. Средняя угловая скорость $\omega_{ср}$ определяется требуемым быстродействием загрузочного устройства и циклом работы автоматического сборочного оборудования. Для проводимого эксперимента требуемое быстродействие задавалось временем $T_{п} \approx 0{,}5$ с.

Анализ результатов динамических испытаний показал, что загрузочное устройство с рекуперацией энергии характеризуется относительно высокой средней угловой скоростью $\omega_{ср0} = 9{,}81\,c^{-1}$, низкими значениями коэффициентов динамичности $K_д = 6{,}82...10{,}3$; $K^*_д = 4{,}75...7{,}17$ и коэффициента $O_ε = 0{,}59...0{,}81$. Исследуемый механизм имеет относительно высокую быстроходность: $K / K_б = 0{,}28...0{,}65$; $K_0 / K_б = 0{,}53...1{,}34$ и, соответственно, значения комплексного критерия $A_ω / A_{ωб} = 0{,}08...0{,}19$. Диапазон полученных значений параметра $A_д / A_{дб} = 395...554$ свидетельствует о средних режимах работы механизма.

Выводы:

1. Результаты моделирования и экспериментального исследования динамики рекуперативного загрузочного устройства с циклоидальным механизмом, подтвердили его высокое быстродействие и благоприятные динамические характеристики.

2. Продолжительность успокоения колебаний ведомой массы в точке позиционирования зависит от упругих свойств пружин растяжения-сжатия, частоты и коэффициента демпфирования собственных колебаний системы.

3. Загрузочные устройства с рекуперацией энергии могут быть применены в гибких производственных сборочных системах мелких деталей, характеризующихся малой длительностью цикла (менее 1 с), в качестве поворотных столов, кантователей, приводах ориентирующих устройств и т. д., что дает возможность увеличить производительность в 2…2,5 раза по сравнению с традиционными схемами приводов.

Список литературы

1. Безъязычный В.Ф., Надеждин И.В. Сравнительная оценка кинематических характеристик механизмов вспомогательного оборудования автоматизированного сборочного производства // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2007. № 5. С. 3 – 13.

2. Безъязычный В.Ф., Надеждин И.В. Повышение производительности автоматизированной сборки за счет увеличения быстродействия транспортно-загрузочного оборудования // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2007. № 4. С. 6 – 11.

3. Житников Ю.З. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов / Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, А.Г. Схиртладзе, А.Л. Симаков, Д.С. Воркуев; под об. ред. Ю.З. Житникова. Ковров: КГТА, 2008. 616 с.

4. Надеждин И.В. Высокодинамичные механизмы вспомогательных операций автоматизированных сборочных производств / под ред. В.Ф. Безъязычного. М.: Машиностроение, 2008. 270 с.

5. Надеждин И.В. Быстродействующие манипуляторы для автоматизации процессов сборки мелких деталей в машиностроении и приборостроении // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2005. № 8. С. 20 – 27.

6. Надеждин И. В. Исполнительные механизмы цикловых машин-автоматов и мехатронных систем // LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland/ Германия, 2015. 280 с.

7. Надеждин И.В., Молчанов А.А. Поворотное устройство. Патент 144750 Российская Федерация, Бюл. № 24, 2014. 3 с.

8. Надеждин И. В. Поворотное устройство. Патент 2304242 Российская федерация. Бюл. № 22, 2007. 3 с.

9. Надеждин И.В. Экспериментальное исследование динамики механизмов углового позиционирования быстродействующих мехатронных систем. Динамика систем, механизмов и машин // Сб. докл. Y Междунар. Науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУю 2004. С. 452 – 455.

10. Нахапетяе Е.Г. Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства. М.: Наука. 1985. 225 с.

11. Дэбни Дж. Б. Simulinnk® 4. Секреты мастерства / Дж. Б. Дэбни, Т.Л. Харман; пер. с англ. М. Л. Симонов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.

Надеждин Игорь Валентинович, д-р техн. наук, доцент, nadezhdin@rsatu.ru, Россия, Рыбинск, ООО «НПФ ИНТЕГРАЛ»

HIGH SPEED LOADING DEVICE WITH ENERGY RECOVERY FOR AUTOMATED SYSTEMS

I.V. Nadezhdin

The results of dynamic characteristics of high speed loading cycloidal devices with regenerative spring engine of the automation systems is provided in article on the basis of computer simulation and experimental investigation taking into account elastic properties of the spring drive and executive links.

Keywords: automation, loading cycloidal devices, regenerative spring engine, dynamic models, mathematical modeling; productivity.

Nadezhdin Igor Valentinovich, doctor of technical sciences, docent, nadezhdin@rsatu.ru, Russia, Rybinsk, NPF INTEGRAL Ltd

УДК 621.9.06-52
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-551-552

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БУНКЕРНОГО ЗАГРУЗОЧНО-ОРИЕНТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С НАКЛОННЫМ ДИСКОМ И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМИ КАРМАНАМИ ДЛЯ СЛОЖНЫХ СТУПЕНЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

А.А. Борисов, С.А. Васин, Е.В. Пантюхина

В статье представлена разработанная для сложных ступенчатых заготовок математическая модель, позволяющая учесть влияние на производительность бункерного загрузочно-ориентирующего устройства с наклонным диском и тангенциальными карманами его параметров и параметров сложных ступенчатых заготовок. Проведено теоретическое исследование влияния всех параметров модели на значения производительности устройства и определены параметры, при которых будут обеспечены ее максимальные значения.

Ключевые слова: бункерное загрузочно-ориентирующее устройство, производительность, вероятность захвата заготовок, автоматическая загрузка.

Для математического описания производительности механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств (БЗУ) используется комплексный подход, методология которого представлена в работах [1-3]. Используя данную методологию разработаем математическую модель производительности механического БЗУ с наклонным диском и тангенциальными карманами, в котором реализовано активное ориентирование заготовок [4].

Математическая модель производительности для усовершенствованного БЗУ с использованием формул (3.1) и (3.2) может быть записана в общем виде:

$$\Pi = \Pi_{\text{Т}}\eta = \frac{60\upsilon}{t}\left[p_i p_c \left(1 - \frac{\upsilon^4}{\upsilon_{\text{пред}}^4} \right) \right], \qquad (1)$$

где $\Pi_{\text{Т}}$ – теоретическая производительность БЗУ (шт./мин), определяемая как произведение числа захватывающих органов (карманов) k и частоты их вращения n, об./мин; η – вероятность захвата изделий захватывающими органами БЗУ [40]; $t = \delta + l_{\text{к}}$ – шаг расположения органов захвата – карманов БЗУ, который определяется расстоянием δ между органами захвата и их длиной $l_{\text{к}} = l + \Delta_{\text{к}}$, м; $\Delta_{\text{к}}$ – зазор между стенкой кармана и заготовкой, м; p_i, p_c – вероятности, характеризующие соответственно благоприятное положение предмета для его захвата и отсутствие помех от сцепляемости предметов друг с другом; υ, $\upsilon_{\text{пред}}$ – фактическая окружная скорость органов захвата и ее предельное значение соответственно, при которых в карман не успеет запасть ни одна заготовка, м/с [5– 7].

Вероятность p_i позволяет оценить влияние на производительность БЗУ геометрических параметров заготовок (наибольшего d_1 и наименьшего d_2 диаметров каждого из торцов, общей длины l предмета и длин l_1 и l_2 его составных частей, координаты центра масс x_c, диаметра и длин внутренних полостей при их наличии), угла наклона бункера $\alpha_д$, коэффициента трения μ между предметами и конструктивными элементами БЗУ, размера B захватывающего органа, по которому осуществляется захват предметов, радиус R вращающегося диска БЗУ в зоне расположения органов захвата. С помощью данной вероятности также оценивается влияние на производительность таких факторов как количество положений, занимаемых заготовкой на вращающемся диске, из которых возможно приведение его в требуемое ориентированное положение, возможности поворота предмета на вращающемся диске к захватывающему органу той из его сторон, которой будет обеспечен захват предмета в требуемом положении. Кроме этого при захвате заготовки учитываются все силы, действующие на предмет в момент его начального движения в захватывающий орган БЗУ [8].

Вероятность p_c позволяет оценить влияние на производительность БЗУ геометрических параметров предметов и коэффициента трения μ_0 между предметами при их взаимосцепляемости.

В различных видах массовых производств, преимущественно в патронном производстве, широко распространены ступенчатые заготовки тел вращения, у которых длина в 3 и более раз превышает их наибольший диаметр (так называемые стержневые заготовки), среди которых большая доля ступенчатых заготовок. К таким заготовкам можно отнести заготовки, имеющие разные диаметры торцов (цилиндрические ступенчатые), и заготовки, у которых различные их части имеют как цилиндрическую, так и коническую форму (сложные ступенчатые).

Основываясь на методику построения математических моделей вероятности захвата сложной ступенчатой заготовки (рис. 1) и производительности, получим следующие выражения вероятностей, входящих в нее для получения записи в виде выражения (1):

$$p_i = 1-(1-p_{i\max})^3(1-p_{i\min})^{\frac{\pi R\phi_{захв}}{180l}},$$

в которой

$$p_{i\max} = \frac{2p_б + p_{II} + p_I + p_V}{2\pi} \times$$

$$\times\left[\pi - \arccos\frac{x_c}{\sqrt{{x_c}^2 + 0{,}25d_1^4}} - \arccos\frac{l-x_c}{\sqrt{(l-x_c)^2 + 0{,}25d_2^4}} - 2\arcsin\frac{\mu}{\alpha_д} - \right.$$

$$\left. - \arccos\frac{l_1-x_c}{\sqrt{(l_1-x_c)^2 + 0{,}25d_1^4}} + 2\arccos\frac{l_1+l_{ук}-x_c}{\sqrt{(l_1+l_{ук}-x_c)^2 + 0{,}25d_2^4}}\right],$$

$$p_{i\min} = \frac{p_б}{\pi}\left[\arcsin\frac{d_1+\Delta}{\sqrt{d_1^2+l_1^2}} - \arccos\frac{l_1}{\sqrt{l_1^2+d_1^2}}\right],$$

где

$$p_б = \frac{x_c}{2\sqrt{{x_c}^2+0,25d_1^4}} + \frac{l-x_c}{2\sqrt{(l-x_c)^2+0,25d_2^4}} - 1 +$$

$$+\cos[\arccos\frac{l_1-x_c}{\sqrt{(l_1-x_c)^2+0,25d_1^4}} - \arccos\frac{l_1+l_V-x_c}{\sqrt{(l_1+l_V-x_c)^2+0,25d_2^4}}].$$

$$p_I = \frac{1}{2} - \frac{x_c}{2\sqrt{{x_c}^2+0,25d_1^4}},\ p_{II} = \frac{1}{2} - \frac{l-x_c}{2\sqrt{(l-x_c)^2+0,25d_2^4}},$$

$$p_V = 1-\cos[\arccos\frac{l_1-x_c}{\sqrt{(l_1-x_c)^2+0,25d_1^4}} - \arccos\frac{l_1+l_V-x_c}{\sqrt{(l_1+l_V-x_c)^2+0,25d_2^4}}].$$

$$p_c = 1-\frac{\arctan(\mu_0)\left[\sqrt{2}\left(4F_I+4F_{II}\right)+(6F_I+6F_{II}+10F_{III}+10F_{IV}+10F_V)\right]}{25\sqrt{2}\pi[F_I+F_{II}+F_{III}+F_{IV}+F_V]},$$

где

$$F_I = \frac{\pi d_1^2}{4},\ F_{II} = \frac{\pi d_2^2}{4},\ F_{III} = \pi d_1 l_1,\ F_{IV} = \pi d_2(l-l_1-l_{ук}),\ F_V = \pi\left(\frac{d_1}{2}-\frac{d_2}{2}\right)l_{ук}.$$

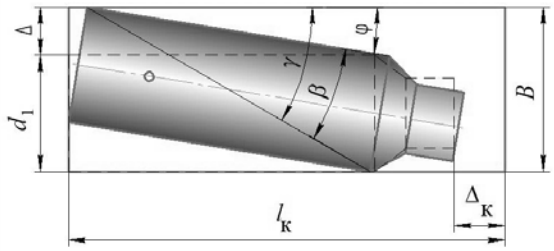


Рис. 1. Расчетная схема сложной ступенчатой заготовки

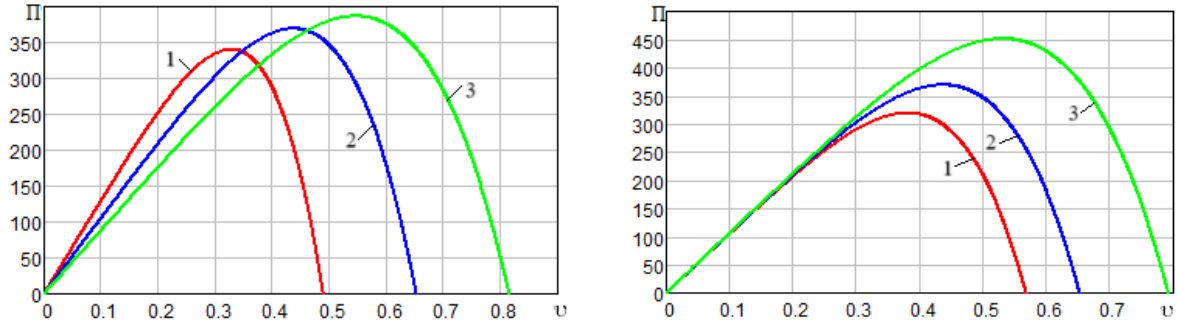
Для сплошной заготовки типа III получено:

$$\upsilon_{пред} = \Delta_к\sqrt{\frac{mgd_1^2\sin\alpha_д}{\Delta h\left[2md_1^2+\left[\rho\cdot\pi\left(\begin{array}{c}\frac{1}{6}l_{ук}(d_1^2+d_1d_2+d_2^2)\frac{d_1^5-d_2^5}{d_1^3-d_2^3}+\\ +l_1\cdot\frac{d_1^4}{4}+(l-l_1-l_{ук})\cdot\frac{d_2^4}{4}\end{array}\right)\right]\right]}.$$

С помощью разработанной программы было выявлено, что влияние на производительность БЗУ ширины кармана, радиуса диска, коэффициентов трения между заготовками и между заготовками и БЗУ не существенно. Примем эти параметры постоянными: $\Delta = 0,1d_1$; R=0,25 м; $\mu_0 = 0,3$; $\mu = 0,4$.

Исследование производительности проводилось при постоянном значении большего диаметра заготовки $d_1 = 0,01$м; $l_1 = 0,6l$; $l_{\text{ук}} = 0,15l$; $x_c = 0,25l$.

Результаты влияния на производительность БЗУ геометрических параметров заготовок, а именно соотношений $a = l/d_1$ (при $c = d_2/d_1 = 0,7$) и диаметров торцов $c = d_2/d_1$ (при $a = l/d_1 = 4$), а также окружной скорости υ карманов БЗУ, при $\alpha_д = 45^\circ$ и $\Delta_к = 0,15l$ представлены на графиках рис. 2. Максимальные значения производительности БЗУ составляют 335..380 шт./мин, но для заготовок с соотношением $a = 3$ они достигаются при гораздо меньших скоростях, чем для заготовок с $a = 4$ и $a = 5$ (см. рис. 2, а). Чем больше значение соотношения диаметров торцов $c = d_2/d_1$, тем больше производительность БЗУ; максимальная производительность БЗУ в зависимости от соотношения *c* составляет от 310 до 450 шт./мин. Достижение максимальных значений производительности происходит на более низких окружных скоростях у заготовки с параметром $c = 0,5$ (см. рис. 2, б).



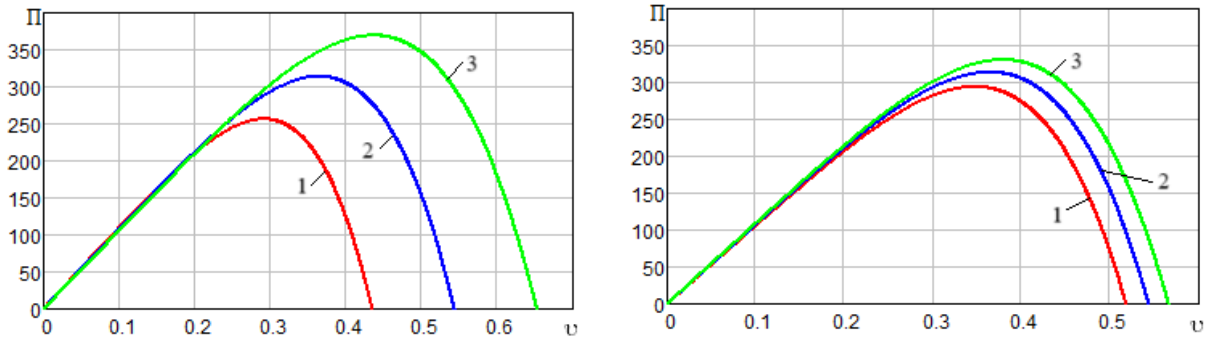
а ***б***

Рис. 2. Результаты влияния на производительность (шт./мин) БЗУ соотношений длины и большего диаметра заготовок $a = l/d_1$ ***(а) при*** $a = 3$ ***(1),*** $a = 4$ ***(2),*** $a = 5$ ***(3) и диаметров торцов*** $c = d_2/d_1$ ***(б) при*** $c = 0,5$ ***(1),*** $c = 0,6$ ***(2),*** $c = 0,7$ ***(3) от окружной скорости*** υ ***(м/с)***

Результаты влияния на производительность усовершенствованного БЗУ зазоров $\Delta_к$ (при $\alpha_д = 45^\circ$), угла наклона $\alpha_д$ (при $\Delta_к = 0,15l$) и окружной скорости υ карманов при $a = l/d_1 = 4$ и $c = d_2/d_1 = 0,6$ представлены на рис. 3.

Наибольшие значения производительности БЗУ при изменении параметра $\Delta_к$ достигаются при гораздо меньших скоростях для заготовок с $\Delta_к = 0,1l$, но значения производительности минимальны. При увеличении зазора $\Delta_к = 0,1l$ до $\Delta_к = 0,125l$ и с $\Delta_к = 0,125l$ до $\Delta_к = 0,15l$ производительность БЗУ увеличивается и составляет от 250 до 360 шт./мин (см. рис. 3, а). Угол наклона $\alpha_д$ не оказывает существенного влияния на производительность БЗУ, так как разница в значениях составляет около 5 %, составляя от 280 до 325 шт./мин (см. рис. 3, б).

Таким образом, значения максимальной производительности БЗУ в зависимости от его параметров и параметров загружаемых заготовок находятся в районе от 250 до 450 шт./мин. При этом их максимальные значения достигаются при наибольшей величине зазора $\Delta_к$, значения которого ограничиваются возможностью захвата одним карманом нескольких заготовок.



а ***б***

Рис. 3. Результаты влияния на производительность (шт./мин) БЗУ зазоров $\Delta_к$ ***(а)*** $\Delta_к = 0{,}1l$ ***(1),*** $\Delta_к = 0{,}125l$ ***(2),*** $\Delta_к = 0{,}15l$ ***(3) и углов*** $\alpha_д$ ***при*** $\alpha_д = 40^\circ$ ***(1),*** $\alpha_д = 45^\circ$ ***(2),*** $\alpha_д = 50^\circ$ ***(3) в зависимости от окружной скорости*** υ ***(м/с)***

Разработанная математическая модель производительности стержневых ступенчатых заготовок тел вращения в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами позволяет определить диапазоны фактической производительности данного БЗУ и выявить значения его параметров, при которых будут обеспечены ее требуемые значения. Данная модель представляет собой совокупность математических зависимостей, позволяющих описать влияние на производительность конструктивных и кинематических параметров БЗУ, геометрических параметров загружаемых заготовок, учесть коэффициент трения материалов, из которых они изготовлены. Наличие таких моделей на ранних этапах проектирования существенно сокращает материальные и временные затраты, позволяет оптимизировать процесс автоматической загрузки, обеспечить его эффективность в целом.

Список литературы

1. Пантюхина Е.В. Методология комплексного подхода для оценки производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств/ Материалы IV Международной научно-технической конференции в г. Омск; науч. ред. П.Д. Балакин. 2020. С. 380–388.

2. Васин С.А., Пантюхина Е.В. Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2023. № 3. С. 64–88.

3. Pantyukhina E.V. Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1546 (2020) 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012024.

4. Пантюхина Е.В., Борисов А.А., Васин С.А., Клентак А.С. Математическое описание вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 466–476.

5. Васин С.А., Пантюхина Е.В. Основные направления проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств для асимметричных деталей формы тел вращения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (89). С. 8-15.

6. Васин С.А., Пантюхина Е.В. Этапы проектирования дисковых бункерных загрузочных устройств для асимметричных предметов обработки формы тел вращения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 145-149.

7. Васин С.А., Шевченко С.Н., Пантюхина Е.В., Маликов А.А. Методологический подход к исследованию и проектированию механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. № 1 (117). С. 70-75.

8. Пантюхина Е.В., Васин С.А., Шевченко С.Н., Борисов А.А. Факторы, влияющие на производительность механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Самара: Самарский федеральный исследовательский центр РАН, 2024. Вып. 3. С. 99–104.

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

Васин Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор, профессор-консультант, vasin_sa53@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пантюхина Елена Викторовна, д-р техн. наук, доцент, профессор, e.v.pant@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MATHEMATICAL MODEL AND THEORETICAL STUDY OF FEED RATE OF HOPPER FEEDING-ORIENTING DEVICE WITH INCLINED DISK AND TANGENTIAL POCKETS FOR COMPLEX STEPPED BILLETS

A.A. Borisov, S.A. Vasin, E.V. Pantyukhina

The article presents a mathematical model developed for complex stepped billets, which allows to take into account the impact on the feed rate of a hopper feeding-orienting device with an inclined disk and tangential pockets of its parameters and parameters of complex stepped billets. A theoretical study of the effect of all model parameters on the device feed rate

values was carried out and the parameters at which its maximum values will be ensured were determined.

Key words: hopper feeding-orienting device, feed rate, probability of workpiece capture, automatic feeding.

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

Vasin Sergey Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, professor consultant, vasin_sa53@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pantyukhina Elena Viktorovna, doctor of technical sciences, docent, professor, e.v.pant@mail.ru, Russia, Tula, Tula state university

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.5:629.3.076
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-558-559

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ТРЕХКОЛЕСНОГО РОБОТА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

С.В. Стельмащук, Р.Е. Хохлов

Представлен вывод модели движения мобильного трехколесного робота на основе математического описания электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением и кинематическими уравнениями колесной пары мобильного робота. Модель рассмотрена в виде структурных схем и передаточных функций. Важным обстоятельством является взаимосвязь между моделью движения и дифференциальным электроприводом мобильного робота.

Ключевые слова: дифференциальный электропривод, структурная схема, передаточная функция, кинематика, траекторная задача.

Введение. Задача управления мобильным роботом (МР) определяется либо как траекторная задача, где задается желаемая траектория в виде уравнения, либо как отработка задания скорости и угла поворота в реальном масштабе времени. В любом случае необходимо знать, как формировать управляющие воздействия на исполнительные органы шасси робота [1], и как учитывать внешние воздействия [2], для задания требуемой скорости и угла поворота робота. В этом случае для исследования вопросов управления роботом актуальным является необходимость в том, чтобы рассмотреть МР как объект управления с точки зрения его движения по поверхности.

Во многих работах по исследованию движения МР рассматриваются математические модели МР в виде системы дифференциальных уравнений, где задачи управления решаются с помощью методов оптимального управления, используя функции Ляпунова и Лагранжа [3;4]. Однако существует необходимость в решении задач управления движением МР методами теории автоматического управления [5]. В рамках статьи поставлена цель, выполнить операторное преобразование математической модели МР с учетом динамики электропривода, и составить структурную схему МР с двумя независимыми приводными колесами. Это приведёт к возможности применения методов классической теории автоматического управления для разработки систем управления движением МР.

Модель движения МР. Математическая модель движения МР составлена с учетом математического описания двух двигателей постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ-НВ), установленных на два ведущих колеса робота. Два двигателя реализуют дифференциальный привод робота, где поворот робота выполняется разными скоростями вращения колес.

Для объяснения параметров кинематики робота в его модели на рис. 1 представлена структурная схема трехколесного МР.

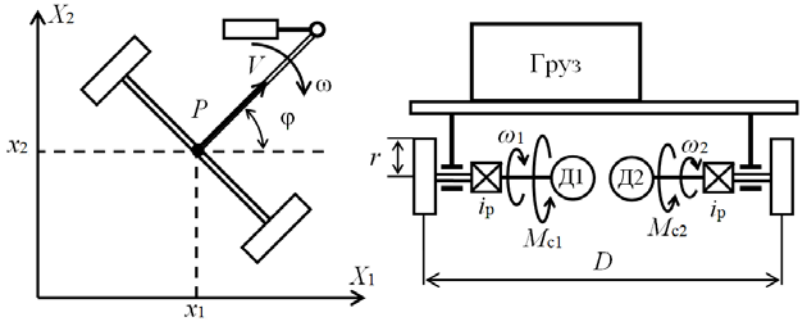


Рис. 1. Кинематическая схема трехколесного МР с дифференциальным приводом

Кинематические уравнения движения МР [3]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = V\cos\varphi; \\ \dot{x}_2 = V\sin\varphi; \\ \dot{\varphi} = \omega, \end{cases} \qquad (1)$$

где V – линейная скорость движения МР; ω – угловая скорость поворота МР. Линейная скорость и скорость поворота МР связаны с угловыми скоростями вращения валов электродвигателей:

$$V = \frac{r}{2i_{\text{р}}}\left(\omega_1 + \omega_2\right); \quad \omega = \frac{r}{Di_{\text{р}}}\left(\omega_1 - \omega_2\right), \qquad (2)$$

где ω_1, ω_2 – скорость вращения валов электродвигателей; $i_{\text{р}}$ – передаточное число редуктора между электродвигателем и ведущим колесом МР.

Ведущие колеса вращаются отдельными электродвигателями и не связаны между собой механически. Используются электродвигатели одной марки равной мощностью и имеют одинаковые параметры. Математическое описание двух ДПТ-НВ:

$$\begin{aligned} J\dot{\omega}_1 &= \text{СФ}I_{\text{я}1} - M_{\text{с}1}; \quad L_{\text{я}}\dot{I}_{\text{я}1} = U_{\text{я}1} - R_{\text{я}}I_{\text{я}1} - \text{СФ}\omega_1; \\ J\dot{\omega}_2 &= \text{СФ}I_{\text{я}2} - M_{\text{с}2}; \quad L_{\text{я}}\dot{I}_{\text{я}2} = U_{\text{я}2} - R_{\text{я}}I_{\text{я}2} - \text{СФ}\omega_2; \end{aligned} \qquad (3)$$

где J – суммарный момент инерции привода отдельного ведущего колеса, учитывающего момент инерции двигателя, редуктора и самого ведущего колеса; С – конструктивная постоянная электродвигателя; Ф – индукция магнитного потока электродвигателя; $L_{\text{я}}$, $R_{\text{я}}$ – индуктивность и активное сопротивление якоря электродвигателя; $U_{\text{я}1}$, $U_{\text{я}2}$ – напряжение и ток якоря

электродвигателей; $I_{я1}$, $I_{я2}$ – токи якоря электродвигателей; $M_{с1}$, $M_{с2}$ – статические моменты на валу электродвигателей.

Система уравнений (2) и (3) представляет собой математическое описание дифференциального электропривода МР, где переменными состояния являются параметры ДПТ-НВ: токи якоря, скорости вала двигателей. Для исследования законов управления движением МР необходимо создать модель, в которой переменными состояния являются параметры, определяющие линейную скорость движения V и угловую скорость поворота ω МР. Такими переменными состояния являются ускорения движения и поворота МР. Модель движения МР должна отображать взаимосвязь механических параметров движения МР и электрических параметров дифференциального электропривода МР.

Используя выражения (2) и уравнения для скоростей двигателей в математическом описании ДПТ-НВ (3), для описания динамики движения МР получим выражения для производных скоростей V и ω:

$$\dot{\omega} = \frac{r}{Di_{\text{р}}}\left(\dot{\omega}_1 - \dot{\omega}_2\right) = \frac{r}{Di_{\text{р}}J}\left(\text{СФ}I_{я1} - M_{с1} - \text{СФ}I_{я2} + M_{с2}\right) = \varepsilon_u + \varepsilon_m, \qquad (4)$$

где ε_u – угловое ускорение поворота МР, обусловленное управляющими моментами двигателей; ε_m – угловое ускорение поворота МР, обусловленное неравномерностью нагрузки на ведущие колеса $\Delta M_{\text{с}} = M_{с1} - M_{с2}$:

$$\varepsilon_u = \frac{r\text{СФ}}{Di_{\text{р}}J}\left(I_{я1} - I_{я2}\right); \quad \varepsilon_m = \frac{r}{Di_{\text{р}}J}\left(M_{с1} - M_{с2}\right). \qquad (5)$$

$$\dot{V} = \frac{r}{2i_{\text{р}}}\left(\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2\right) = \frac{r}{2i_{\text{р}}J}\left(\text{СФ}I_{я1} - M_{с1} + \text{СФ}I_{я2} - M_{с2}\right) = a_u + a_m, \qquad (6)$$

где a_u – линейное ускорение движения МР, обусловленное управляющими моментами двигателей; a_m – линейное ускорение движения МР, обусловленное суммарной нагрузкой на ведущие колеса $M_{с\Sigma} = M_{с1} + M_{с2}$:

$$a_u = \frac{r\text{СФ}}{2i_{\text{р}}J}\left(I_{я1} + I_{я2}\right); \quad a_m = \frac{r}{2i_{\text{р}}J}\left(M_{с1} + M_{с2}\right). \qquad (7)$$

Дифференциальные уравнения (4) и (6) описывают механические процессы движения МР, по сути, являются механической частью модели движения МР. Для описания электрической части модели движения МР необходимо получить производные по времени от углового ускорения и линейного ускорения, обусловленных управляющими моментами двигателей ε_u и a_u. Для этого используются дифференциальные уравнения для токов ДПТ-НВ (3):

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{r\text{СФ}}{Di_{\text{р}}J}\left(\dot{I}_{я1} - \dot{I}_{я2}\right) = \frac{r\text{СФ}}{Di_{\text{р}}J}\left(\frac{U_{я1}}{L_{\text{я}}} - \frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}I_{я1} - \frac{\text{СФ}}{L_{\text{я}}}\omega_1 - \frac{U_{я2}}{L_{\text{я}}} + \frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}I_{я2} + \frac{\text{СФ}}{L_{\text{я}}}\omega_2\right).$$

$$\dot{a}_u = \frac{r\text{СФ}}{2i_{\text{р}}J}\left(\dot{I}_{я1} + \dot{I}_{я2}\right) = \frac{r\text{СФ}}{2i_{\text{р}}J}\left(\frac{U_{я1}}{L_{\text{я}}} - \frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}I_{я1} - \frac{\text{СФ}}{L_{\text{я}}}\omega_1 + \frac{U_{я2}}{L_{\text{я}}} - \frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}I_{я2} - \frac{\text{СФ}}{L_{\text{я}}}\omega_2\right).$$

Приведём подобные члены в выражении в скобках:

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{r\text{СФ}}{Di_\text{р}J}\left(-\frac{R_\text{я}}{L_\text{я}}\left(I_\text{я1}-I_\text{я2}\right)-\frac{\text{СФ}}{L_\text{я}}\left(\omega_1-\omega_2\right)+\frac{1}{L_\text{я}}\left(U_\text{я1}-U_\text{я2}\right)\right).$$

$$\dot{a}_u = \frac{r\text{СФ}}{2i_\text{р}J}\left(-\frac{R_\text{я}}{L_\text{я}}\left(I_\text{я1}+I_\text{я2}\right)-\frac{\text{СФ}}{L_\text{я}}\left(\omega_1+\omega_2\right)+\frac{1}{L_\text{я}}\left(U_\text{я1}-U_\text{я2}\right)\right).$$

Учитывая выражения (2), (5) и (7) получим:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_u &= -\frac{1}{T_\text{я}}\varepsilon_u - \frac{1}{T_\text{я}T_\text{м}}\omega + \frac{r\big/\left(Di_\text{р}\right)}{\text{СФ}T_\text{я}T_\text{м}}\left(U_\text{я1}-U_\text{я2}\right);\\ \dot{a}_u &= -\frac{1}{T_\text{я}}a_u - \frac{1}{T_\text{я}T_\text{м}}V + \frac{r\big/\left(2i_\text{р}\right)}{\text{СФ}T_\text{я}T_\text{м}}\left(U_\text{я1}+U_\text{я2}\right),\end{aligned} \qquad (8)$$

где $T_\text{я}$, $T_\text{м}$ – электромагнитная и электромеханическая постоянные времени ДПТ-НВ:

$$T_\text{я} = \frac{L_\text{я}}{R_\text{я}}; \qquad T_\text{м} = \frac{JR_\text{я}}{\left(\text{СФ}\right)^2}. \qquad (9)$$

Уравнения (8) описывают электрическую часть модели движения МР. Система уравнений (4), (6) и (8) представляет собой модель движения МР.

Структурная схема движения МР. Анализируя модель движения видно что, поворот МР зависит от разности напряжений на якорях электродвигателей $\Delta U_\text{я} = U_\text{я1} - U_\text{я2}$ как управляющего воздействия и от неравномерности нагрузки $\Delta M_\text{с}$ как возмущающего воздействия. Линейная скорость МР зависит от суммарного значения напряжений на якорях электродвигателей $U_{\text{я}\Sigma} = U_\text{я1} + U_\text{я2}$ как управляющего воздействия и суммарной нагрузкой $M_{\text{с}\Sigma}$ как возмущающего воздействия. Структурные схемы модели движения МР представлены на рис. 2 и рис. 3.

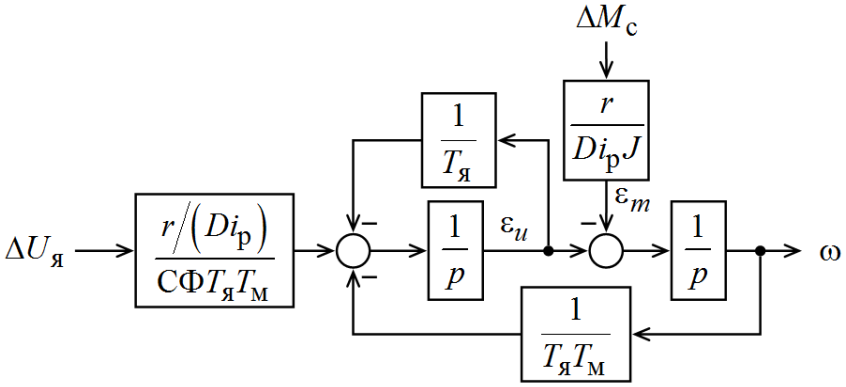


Рис. 2. Структурная схема угловой скорости поворота МР

Передаточные функции по управлению и возмущению структурной схемы угловой скорости поворота МР:

$$W_{\omega}^{u}(p)=\frac{\omega(p)}{\Delta U_{\text{я}}(p)}=\frac{\frac{r}{Di_{\text{р}}\text{СФ}}}{T_{\text{м}}T_{\text{я}}p^{2}+T_{\text{м}}p+1};$$
$$W_{\omega}^{m}(p)=\frac{\omega(p)}{\Delta M_{\text{с}}(p)}=-\frac{\frac{rT_{\text{м}}}{Di_{\text{р}}J}(T_{\text{я}}p+1)}{T_{\text{м}}T_{\text{я}}p^{2}+T_{\text{м}}p+1}. \quad (10)$$

Статическая характеристика угловой скорости поворота МР:

$$\omega=W_{\omega}^{u}(0)\Delta U_{\text{я}}+W_{\omega}^{m}(0)\Delta M_{\text{с}}=\frac{r}{Di_{\text{р}}\text{СФ}}\Delta U_{\text{я}}-\frac{rT_{\text{м}}}{Di_{\text{р}}J}\Delta M_{\text{с}}.$$

Передаточные функции по управлению и возмущению структурной схемы линейной скорости движения МР:

$$W_{V}^{u}(p)=\frac{V(p)}{U_{\text{я}\Sigma}(p)}=\frac{\frac{r}{2i_{\text{р}}\text{СФ}}}{T_{\text{м}}T_{\text{я}}p^{2}+T_{\text{м}}p+1};$$
$$W_{V}^{m}(p)=\frac{V(p)}{M_{\text{с}\Sigma}(p)}=-\frac{\frac{rT_{\text{м}}}{2i_{\text{р}}J}(T_{\text{я}}p+1)}{T_{\text{м}}T_{\text{я}}p^{2}+T_{\text{м}}p+1}. \quad (11)$$

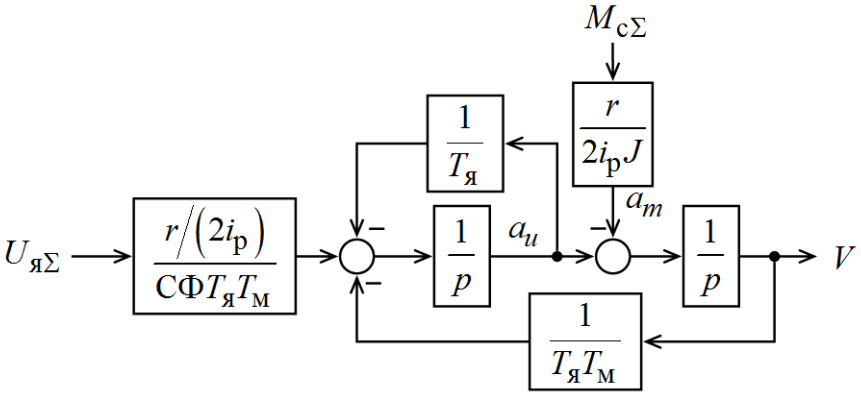


Рис. 3. Структурная схема линейной скорости движения МР

Статическая характеристика линейной скорости движения МР:

$$V=W_{V}^{u}(0)U_{\text{я}\Sigma}+W_{V}^{m}(0)M_{\text{с}\Sigma}=\frac{r}{2i_{\text{р}}\text{СФ}}U_{\text{я}\Sigma}-\frac{rT_{\text{м}}}{2i_{\text{р}}J}M_{\text{с}\Sigma}.$$

С учетом выражений (2) и (9) можно определить механические характеристики дифференциального электропривода МР:

$$\Delta\omega_{\text{ср}}=\frac{\omega_1-\omega_2}{2}=\frac{Di_{\text{р}}}{2r}\omega=\frac{\Delta U_{\text{я.ср}}}{\text{СФ}}-\frac{R_{\text{я}}}{(\text{СФ})^{2}}\Delta M_{\text{с.ср}};$$
$$\omega_{\text{ср}}=\frac{\omega_1+\omega_2}{2}=\frac{i_{\text{р}}}{r}V=\frac{U_{\text{я.ср}}}{\text{СФ}}-\frac{R_{\text{я}}}{(\text{СФ})^{2}}M_{\text{с.ср}},$$

где $\Delta\omega_{\text{ср}}$, $\Delta U_{\text{я.ср}}$, $\Delta M_{\text{с.ср}}$ – средние разности скоростей, напряжений на

якоре электродвигателей и моментов нагрузки; $\omega_{\text{ср}}$, $U_{\text{я.ср}}$, $M_{\text{с.ср}}$ – средние значения скоростей, напряжения на якоре электродвигателей и моментов нагрузки:

$$\Delta U_{\text{я.ср}} = \frac{U_{\text{я1}} - U_{\text{я2}}}{2} = \frac{\Delta U_{\text{я}}}{2}; \quad U_{\text{я.ср}} = \frac{U_{\text{я1}} + U_{\text{я2}}}{2} = \frac{U_{\text{я}\Sigma}}{2};$$

$$\Delta M_{\text{с.ср}} = \frac{M_{\text{с1}} - M_{\text{с2}}}{2} = \frac{\Delta M_{\text{с}}}{2}; \quad M_{\text{с.ср}} = \frac{M_{\text{с1}} + M_{\text{с2}}}{2} = \frac{M_{\text{с}\Sigma}}{2}.$$

Управление движением МР. Для управления движением МР предлагается использовать следующую зависимость сигналов управления электроприводами постоянного тока, включающими ДПТ-НВ и широтно-импульсный преобразователь (ШИП):

$$u_{\text{у1}} = u_V + u_\omega; \quad u_{\text{у2}} = u_V - u_\omega, \tag{12}$$

где $u_{\text{у1}}$, $u_{\text{у2}}$ – сигналы управления ШИП; u_V, u_ω – сигналы управления линейной скоростью движения и угловой скорости поворота МР соответственно. Задача поддержания линейной и угловой скорости перемещения в соответствии по оптимальному профилю является актуальной в робототехнике [6].

Зависимость управляющих сигналов ШИП от сигналов управления движением МР (12) обусловлена критерием сохранения модуля линейной скорости при повороте МР.

Напряжения на якоре электродвигателей регулируются с помощью ШИП сигналами управления:

$$U_{\text{я1}} = K_{\text{п}} u_{\text{у1}}; \qquad U_{\text{я2}} = K_{\text{п}} u_{\text{у2}}, \tag{13}$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент усиления широтно-импульсного преобразователя, то разность напряжений и суммарное напряжение якоря электродвигателей с учетом (12) и (13):

$$\Delta U_{\text{я}} = U_{\text{я1}} - U_{\text{я2}} = 2K_{\text{п}} u_\omega; \qquad U_{\text{я}\Sigma} = U_{\text{я1}} + U_{\text{я2}} = 2K_{\text{п}} u_V. \tag{14}$$

Из (14) следует, что сигнал управления угловой скоростью поворота МР u_ω определяет только разность напряжений $\Delta U_{\text{я}}$, а, следовательно, угловую скорость поворота МР ω, и не влияет на суммарное напряжение $U_{\text{я}\Sigma}$ и, следовательно, на линейную скорость движения МР *V*, которая зависит только от сигнала управления линейной скоростью движения МР u_V.

Структурная схема дифференциального электропривода постоянного тока МР представлена на рис. 4.

С учетом (14) передаточные функции по управлению и возмущению дифференциального электропривода на рис. 4 идентичны передаточным функциям (10) и (11).

При решении траекторных задач движения МР с использованием управления по выражениям (12) необходимо учесть особенность: при движении МР на большой скорости при повороте может возникнуть ситуация, когда $u_{\text{у1}} \geq u_{\text{у}max}$ или $u_{\text{у2}} \leq -u_{\text{у}max}$, где $u_{\text{у}max}$ – максимальное значение сигнала управления. В этом случае линейная скорость МР будет

уменьшаться, что вызовет ошибки в решении траекторных задач при движении МР. В этом случае возникает необходимость в применении согласованного управления систем регулирования линейной и угловой скорости МР [7].

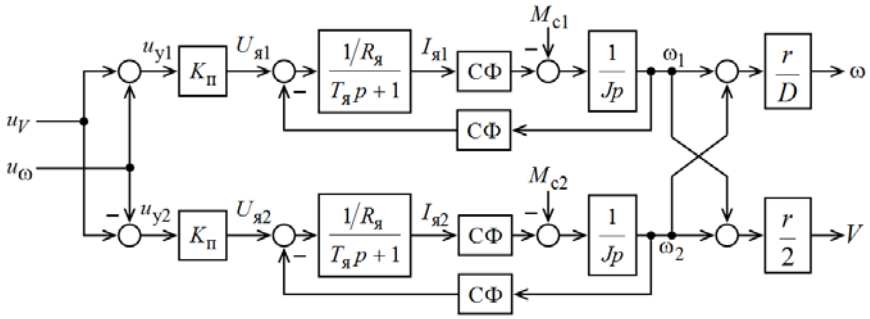


Рис. 4. Структурная схема дифференциального электропривода МР на основе ДПТ-НВ

Заключение. Идентичность передаточных функций модели движения МР и дифференциального электропривода МР позволяет выполнять синтез системы управления движением МР, которая применима к дифференциальному электроприводу МР. Используя датчики скорости электродвигателей, определяются линейная скорость и угловая скорость поворота МР в соответствии с зависимостями (2). С помощью сигналов с датчиков тока якоря по выражениям (5) и (7) вычисляются ускорения движения ε_u и поворота a_u. Также можно применить методы идентификации нагрузки [8;9] для определения значений ускорений ε_m и a_m на основании выражений (5) и (7).

Модель движения МР в виде структурной схемы и соответствующих передаточных функций позволит применять не только методы классической теории автоматического управления, но современные подходы, связанные с нечеткой логикой и нейронными сетями [10;11].

Список литературы

1. Мирошник И.В., Шалаев А.Н. Управление траекторным движением автономных роботов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2002. №6. С. 237-242.

2. Чэ М., Кулик А.А. Управление отслеживанием траектории колесного мобильного робота с учетом внешних возмущений // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 2. С. 92-98.

3. Кочетков С.А., Уткин В.А. Метод декомпозиции в задачах управления мобильными роботами // Автоматика и телемеханика. 2011. № 10. С. 86-103.

4. Мартыненко Ю. Г. Управление движением мобильных колёсных роботов // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11, № 8. С. 29-80.

5. Лямин М.А., Черный С.П. Система совместного управления электроприводами мотор-колесо робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 7(71). С. 66-73.

6. Горькавый М.А., Мельниченко М.А., Соловьев В.А., Горькавый А.И. Алгоритм поиска оптимальных параметров движения при прямолинейных технологических переходах коллаборативного робота // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2024. № 5(77). С. 22-35.

7. Стельмащук С.В., Челухин В.А. Согласованное управление однотипными объектами без учёта перекрёстных связей между сепаратными каналами // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 7(47). С. 48-58.

8. Лебедев С.К., Коротков А.А. Алгоритмы синтеза наблюдателей нагрузки электропривода // Вестник ИГЭУ. 2009. Вып. 3. С. 5–8.

9. Стельмащук С.В., Аминов К.С. Электропривод с компенсацией статического момента // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 3(43). С. 73-80.

10. Хрульков В.Н., Черный С.П. Особенности реализации нечётких алгоритмов управления на базе программируемых логических контроллеров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 1(57). С. 52-62.

11. Максимова Н. А., Черный С.П., Сухоруков С.И. Особенности моделирования развитых нечётких систем с алгоритмом вывода Мамдани для управления электроприводами постоянного тока // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 1(49). С. 37-50.

Стельмащук Сергей Валерьевич, канд. техн. наук, доцент, rukdpsv@rambler.ru, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

Хохлов Роман Евгеньевич, студент, Roman12279@gmail.com, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет,

MOTION MODEL OF MOBILE TRICYCLE ROBOT AS CONTROL OBJECT

S.V. Stelmashchuk, R.E. Hokhlov

The paper presents the derivation of a motion model for a mobile three-wheeled robot based on a mathematical description of DC electric motors with independent excitation and kinematic equations of a mobile robot's wheelset. The model is considered in the form of structural schemes and transfer functions. An important consideration is the relationship between the motion model and the differential electric drive of the mobile robot.

Key words: differential electric drive, block diagram, transfer function, kinematics, trajectory task.

Stelmashchuk Sergei Valerevich, candidate of technical sciences, docent, rukdpsv@rambler.ru, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State University,

Hokhlov Roman Evgenevich, student, Roman12279@gmail.com, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State University

УДК 681.51: 676.082.4
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-566-567

ДЕКОМПОЗИЦИЯ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛОАГРЕГАТА КАК СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Д.А. Ковалёв

В ходе исследований приведено описание технологических процессов содорегенерационного котлоагрегата (СРК), с применением системного анализа выполнена декомпозиция сложного объекта управления – СРК на подсистемы: подготовки черного щелока к сжиганию, подготовки воздуха, сжигания черного щелока в топке, парообразования и питательной воды, очистки дымовых газов, зеленого и белого щелока. Для подсистем СРК определены управляющие и возмущающие воздействия. Выполнена разработка концептуальной модели СРК в виде структуры СРК, состоящей из взаимосвязей (причинно-следственных связей) между его элементами – подсистемами СРК для достижения целей моделирования. В результате исследований сформулирован критерий производительности зеленого щелока для СРК.

Ключевые слова: содорегенерационный котлоагрегат, управляющие и возмущающие воздействия СРК, концептуальная модель СРК, критерий производительности зеленого щелока.

Введение. Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) включает в себя большое количество сложных взаимосвязанных подсистем и технологических процессов, начиная от заготовки древесины и заканчивая производством готовой продукции, такой как бумага, картон и целлюлоза.

Одним из важных видов деятельности ЦБП является производство сульфатной целлюлозы [1], которое характеризуется использованием различных методов (способов) производства, наиболее распространенным из которых является сульфатный способ (рис. 1).

В его основе лежит варка древесины в варочных котлах – под воздействием щелочного раствора (белый щёлок), который разлагает лигнин, связующее вещество между волокнами целлюлозы. Полученная после варки целлюлоза затем подвергается отбелке, для достижения необходимой белизны и качественных характеристик. Современные технологии отбелки активно стремятся к минимизации использования хлорсодержащих соединений, заменяя их на более экологически безопасные озоновые, кислородные и перекисные методы.

Процесс регенерации щелоков сульфат-целлюлозного производства. Особое внимание в ЦБП уделяется регенерации химикатов, которая

является не только экономически выгодной, но и критически важной для защиты окружающей среды. После варки образуется черный щёлок – высококонцентрированная смесь органических и неорганических веществ. Черный щёлок содержит ценные химикаты (сульфат натрия), которые можно вернуть в производственный цикл, тем самым снижая потребность в новых химикатах и минимизируя количество отходов.

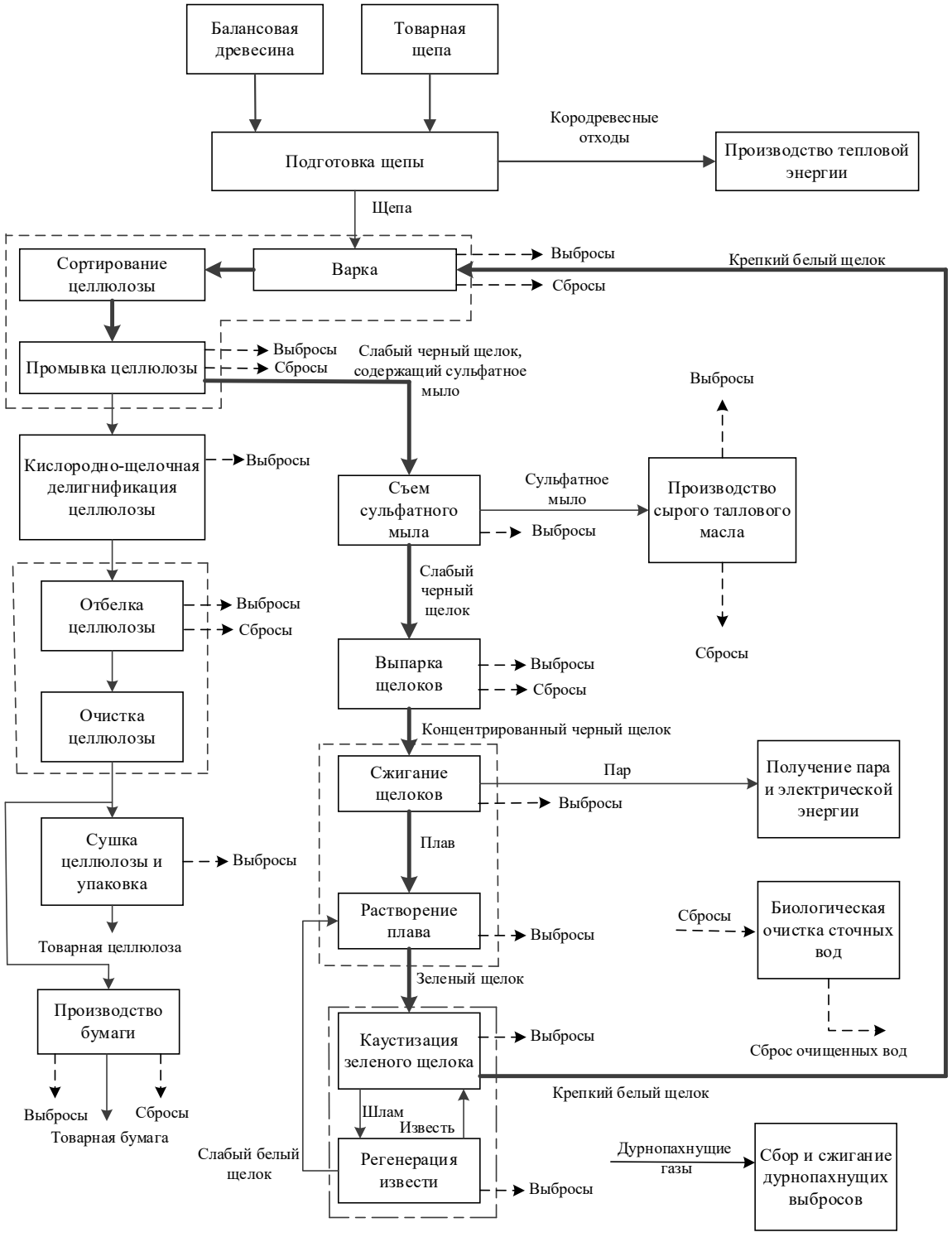


Рис. 1. Схема технологического процесса производства сульфатной целлюлозы [1]

Процесс регенерации щелоков сульфат-целлюлозного производства (рис. 2) включает в себя: выпаривание черного щёлока [2], сжигание упаренного черного щелока в СРК [3-5] с получением энергии и регенерацией химикатов, которые затем используются повторно в процессе варки.

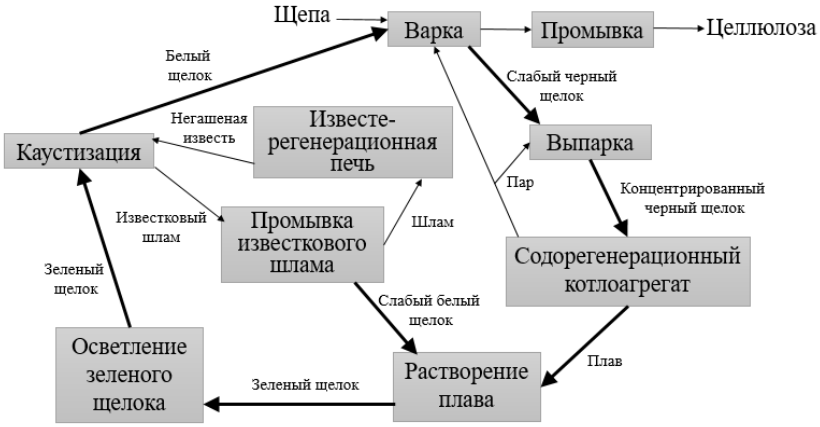


Рис. 2. Общая схема регенерации щелоков сульфат-целлюлозного производства

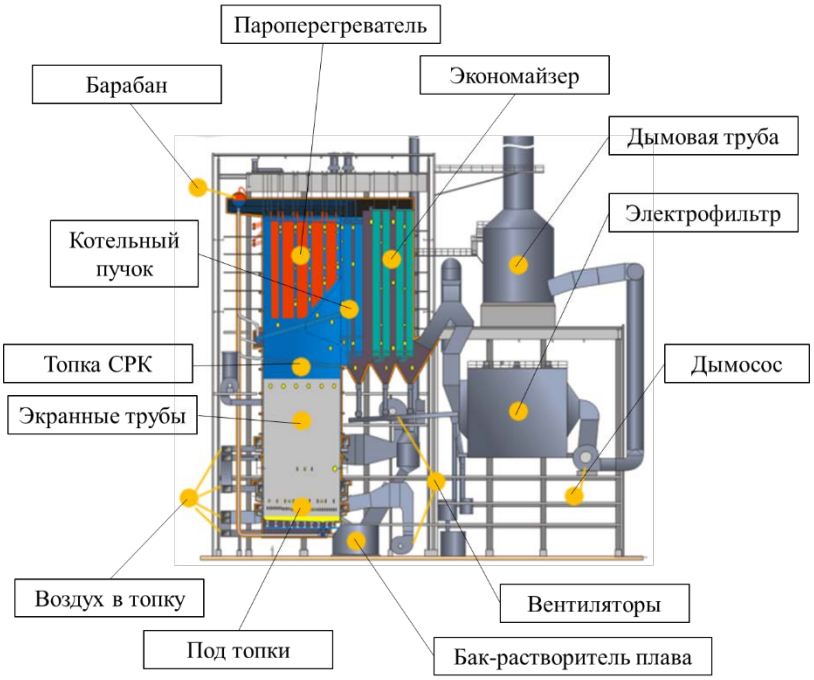


Рис. 3. Содорегенерационный котлоагрегат

Эффективность этого замкнутого цикла является ключевым показателем экологичности предприятия. Несмотря на большое количество проводимых в этом направлении исследований, совершенствование технологий регенерации черного щелока остается одной из приоритетных проблем отрасли.

СРК. Сжигание черного щелока в СРК является одним из основных этапов регенерации химикатов сульфат-целлюлозного. Специфические физико-химические свойства черного щелока определяют своеобразие его

сжигания. Сжигание осуществляется в камерных топках СРК (рис. 3), где поток черного щелока диспергируется с использованием форсунок и капли черного щелока, попадая в топочное пространство, частично подсушиваясь и сгорая, падают на под топки, образуя слой огарка.

Системы автоматического управления (САУ) параметрами технологических процессов СРК (рис. 4) должны обеспечивать решение следующих задач: управление температурой черного щелока на входе в топку СРК; управление степенью восстановления сульфата натрия в сульфид натрия; управление количеством и качеством пылегазовых выбросов в атмосферу: поддержание уровня и плотности зеленого щелока на выходе бака-растворителя плава СРК; обеспечение теплотехнического КПД и паропроизводительности СРК.

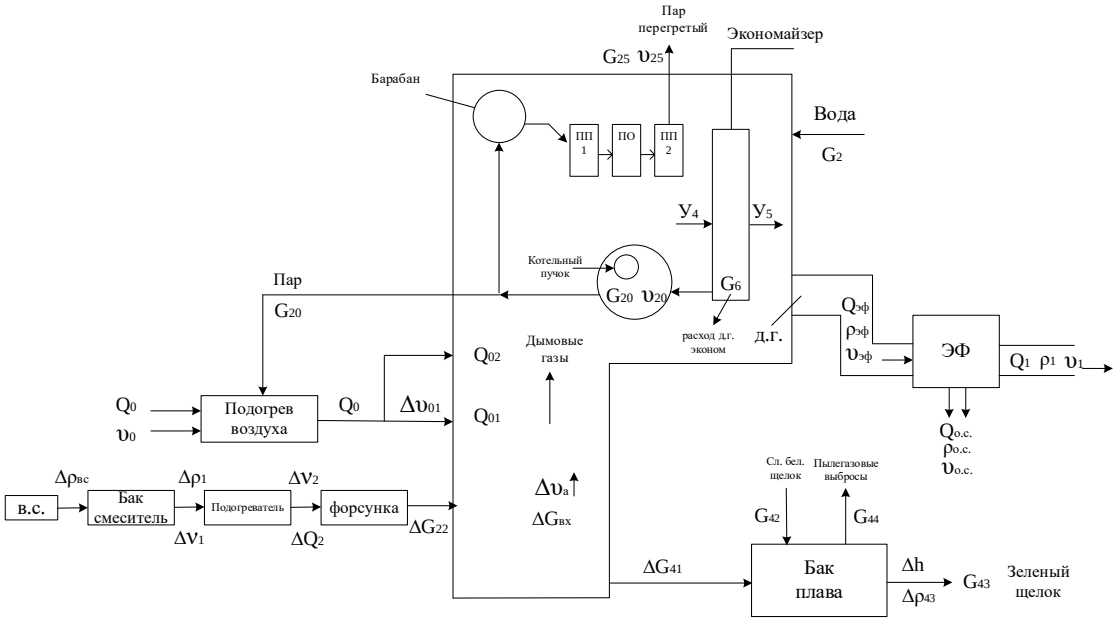


Рис. 4. Технологическая схема СРК

Декомпозиция СРК. При исследовании сложных объектов управления, как правило, используется метод декомпозиции на подсистемы, что упрощает процесс их моделирования [6].

В результате системного анализа сложного объекта управления и его функционирующей среды принимается решение о последовательном использовании неформальной декомпозиции (по терминологии А. А. Вавилова – функционально-целевой [7-8]) при создании математических и имитационных моделей. Модели объекта и его компонентов представляются в виде многомерных подсистем с направленным действием (агрегатов), что соответствует информационно-алгоритмическому подходу, принятому в теории управления, и позволяет использовать современные программные средства для компьютерной имитации и расчетов, ориентированные на «причинно-следственные» модели.

СРК представляет собой сложный объект управления с иерархической структурой, в которой можно выделить четыре уровня иерархии (рис. 5).

В результате декомпозиции СРК можно выделить несколько взаимосвязанных подсистем [9].

Модели подсистем СРК нулевого уровня описываются с помощью систем дифференциальных и алгебраических уравнений, в которых отсутствуют причинно-следственные связи между внутренними переменными.

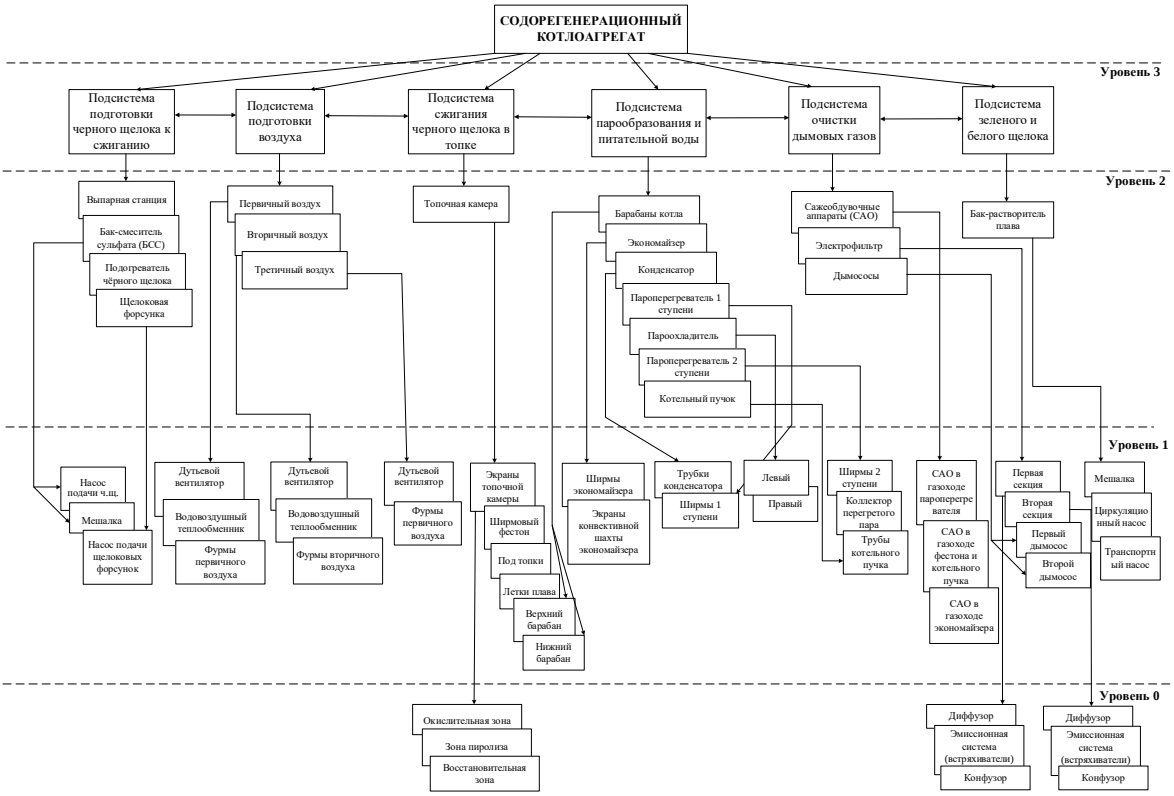


Рис. 5. Подсистемы СРК

Управляющие и возмущающие воздействия подсистем СРК. Для разработки и построения концептуальной модели СРК необходимо располагать данными о характере управляющих и возмущающих воздействий. Анализ работы СРК показывает, что все управляющие и возмущающие воздействия влияют на следующие технологические параметры [10-11]:

степень восстановления сульфата натрия в сульфид натрия;

сульфидность зеленого щелока,

плотность и общую щелочность зеленого щелока,

теплотехнический КПД содорегенерационного агрегата,

производительность СРК по пару и зеленому щелоку,

концентрацию пылевых и газовых выбросов с уходящими дымовыми газами и пылевыми выбросами из бака растворителя плава.

В соответствии с предложенной декомпозицией СРК выполнен анализ управляющих и возмущающих воздействий.

Подсистема подготовки черного щелока к сжиганию. На стадии процесса подготовки черного щелока к сжиганию к управляющим воздействиям относят изменение следующих параметров: расхода греющего пара в выпарную станцию, расхода добавляемого в черный щелок сульфата

натрия, расхода греющего пара в щелоковый подогреватель, расхода черного щелока в топку СРК. К возмущающим воздействиям относятся изменения параметров: плотности черного щелока на входе в выпарную станцию, состояние поверхностей нагрева выпарной станции, качественного состава добавляемого сульфата натрия; температуры черного щелока на входе в щелоковый подогреватель; производительности щелокового подогревателя по черному щелоку; проходного сечения целлюлозных форсунок за счет заростания; соотношения C/Na_2SO_4 в черном щелоке перед форсунками.

Управляющее воздействие изменением подачи греющего пара в выпарную станцию оказывает весьма инерционное и грубое влияние на процесс регенерации химикатов, тогда как управляющее воздействие изменением подачи греющего пара в целлюлозный подогреватель производит малоинерционное и более точное регулирование показателей процесса регенерации химикатов. Основное влияние на такой показатель, как степень восстановления сульфата натрия, оказывает управляющее воздействие изменением расхода, греющего пара на выпарную станцию.

Управляющее воздействие изменением подачи добавляемого в черный щелок сульфата натрия оказывает существенное влияние на степень его восстановления и соответственно на сульфидность зеленого щелока. При изменении подачи добавляемого в черный щелок сульфата натрия переходная функция его степени восстановления обладает минимально-фазовыми свойствами и обеспечивает саморегулирование, тогда как переходная функция сульфидности зеленого щелока на выходе бака-растворителя плава СРК обладает минимально-фазовыми свойствами интегрального характера и не обеспечивает саморегулирование.

В процессе эксплуатации СРК в целях стабилизации сульфидности зеленого щелока необходимо изменять подачу сульфата натрия [10]. Такое управление ведет к существенным издержкам как сульфата натрия, так и состояния технологического оборудования и трубопроводов, что приводит к дополнительным потерям солей натрия.

Возмущающие воздействия на стадии процесса подготовки черного щелока к сжиганию в пределах технологического регламента оказывают меньшее, чем управляющие воздействия, влияние на процесс регенерации химикатов.

Подсистема подготовки воздуха. На стадии процесса подготовки воздуха, подаваемого в топку СРК, к управляющим воздействиям относятся: изменение подачи общего воздуха в топку СРК, изменение соотношения подачи первичного / вторичного / третичного воздуха, изменение подачи греющего пара в калорифер для подогрева общего воздуха.

Возмущающие воздействия: изменение температуры наружного воздуха, состояние парового калорифера для подогрева воздуха и изменение величины разрежения дымовых газов в топке СРК.

Перечисленные возмущающие воздействия являются малоинерционными и оказывают значительное влияние на показатели процесса

регенерации химикатов. Из возмущающих воздействий наиболее значительное влияние оказывает изменение величины разрежения дымовых газов в топке СРК, которое приводит практически к искажению и неравномерности подачи первичного / вторичного / третичного воздуха в топку, и как следствие, к неэффективному процессу регенерации химикатов.

Подсистема сжигания черного щелока в топке. При сжигании черного щелока в топке СРК к управляющим воздействиям относятся: изменения расхода черного щелока подаваемого в топку, дисперсность его распыла на выходе щелоковых форсунок, коэффициента избытка воздуха в топке и отвода из нее уходящих дымовых газов.

К возмущающим воздействиям относятся: изменение выходных параметров процессов подготовки черного щелока к сжиганию и подготовки подаваемого в топку воздуха, изменение состояния поверхностей нагрева водотрубной системы пароперегревателя, направляющих аппаратов дымососа, изменение состояния топки и газохода СРК.

Возмущающие воздействия изменения выходных параметров подсистем подготовки черного щелока к сжиганию и воздуха оказывают влияние на показатели процесса регенерации на уровне управляющих воздействий и носят малоинерционный характер, а также являются источниками возникновения взрывов в топке СРК. Последние два вида возмущений также оказывают влияние на показатели процесса регенерации химикатов, но меньшее по сравнению с управляющими воздействиями, и носят затяжной инерционный характер, вызывая возможность возникновения нештатных ситуаций, снижения надежности отдельных элементов и блоков оборудования.

Подсистема парообразования и питательной воды. Для процесса генерации пара управляющие воздействия представляют собой: изменение подачи питательной воды, расход котловой воды на продувку, подачу охлаждающей воды в пароохладитель, подачу пара на обдув поверхностей нагрева пароперегревателя.

К возмущающим воздействиям относятся: изменение производительности СРК по пару, изменение давления пара, изменение выходных параметров процесса сжигания черного щелока, изменение состояния поверхностей нагрева пароперегревателя, экранных труб, водяного экономайзера, изменение солесодержания питательной воды.

Для подсистемы парообразования и питательной воды наиболее существенным управляющим воздействием, оказывающим влияние на теплотехнический КПД, является изменение подачи пара на обдув поверхностей нагрева. Остальные управляющие воздействия направлены на стабилизацию параметров, обеспечивающих надежность работы и устойчивость процесса генерации и перегрева пара, таких как: уровень воды в барабане, солесодержание котловой воды, температура перегретого пара.

Следует отметить, что возмущающие воздействия достаточно близки по своему характеру к управляющим, и при выходе за пределы технологических норм создают предпосылки для развития потенциально опасных процессов в СРК. Например, изменение выходных параметров процесса

сжигания черного щелока может привести к появлению трещин и свищей в экранных трубах топки, в результате чего котловая вода попадает внутрь топки на огарок, содержащий сульфид натрия (Na_2S), что приводит к взрыву.

Подсистема очистки дымовых газов. Для процесса очистки дымовых газов к управляющим воздействиям относятся: изменение количества отводимых дымовых газов направляющим аппаратом дымососа; изменение напряжения коронирующих электродов электрофильтра.

К возмущающим воздействиям относятся: изменение количественных и качественных показателей пылегазовых выбросов, изменение состояния поверхностей осадительных электродов электрофильтра.

Подсистема зеленого и белого щелока. Для процесса получения зеленого щелока к управляющим воздействиям относятся: изменение подачи слабого белого щелока в бак-растворитель плава и в вытяжную трубу бака-растворителя плава (для очистки пылегазовых выбросов); изменение расхода откачиваемого зеленого щелока из бака-растворителя плава.

К возмущающим воздействиям относятся: изменения подачи плава, изменение качественных показателей слабого белого щелока, изменение количественных и качественных показателей пылегазовых выбросов, изменение дисперсности распыла плава.

Все управляющие воздействия для подсистемы зеленого и белого щелока стабилизируют такие параметры зеленого щелока, как уровень, плотность, унос солей натрия с пылегазовыми выбросами из бака-растворителя плава. Из возмущающих воздействий наиболее сильно влияют на плотность зеленого щелока унос солей, изменения качественных показателей слабого белого щелока и дисперсности распыла плава.

Анализ управляющих и возмущающих воздействий подсистем СРК в процессе регенерации химикатов дает возможность условно разделить их две группы.

Первая группа управляющих и возмущающих воздействий подсистем СРК влияет на такие показатели процесса регенерации химикатов, как: степень восстановления сульфата натрия, сульфидность зеленого щелока, теплотехнический КПД, унос солей натрия. Эта группа определяет технико-экономическую эффективность работы СРК.

Вторая группа управляющих и возмущающих воздействий оказывает влияние на стабилизацию обеспечивающих технологических параметров таких как: уровень воды в барабане котла, уровень зеленого щелока в баке-растворителе плава, разрежение дымовых газов в топке, формирование огарка на поду топки и т.п. Вторая группа, по отношению к первой, главным образом обеспечивает надежность и безопасность работы СРК.

В соответствии с выполненной декомпозицией СРК и анализом управляющих и возмущающих воздействий подсистем СРК целесообразно разработать концептуальную модель СРК.

Концептуальная модель СРК. Концептуальная модель [6, 12, 13] представляет собой абстрактную модель сложного объекта управления –

СРК (рис. 6), она описывает структуру СРК, состоящую из взаимосвязей (причинно-следственных связей) между его элементами – подсистемами СРК для достижения целей моделирования.

Концептуальная модель СРК отражает основные функциональные возможности и характеристики подсистем, их динамические свойства и должна соответствовать технологическим процессам реального сложного объекта управления – СРК. Поэтому в дальнейшем, на всех этапах разработки математических моделей для подсистем СРК, необходим детальный формальный контроль корректности концептуальной модели СРК реальному объекту управления.

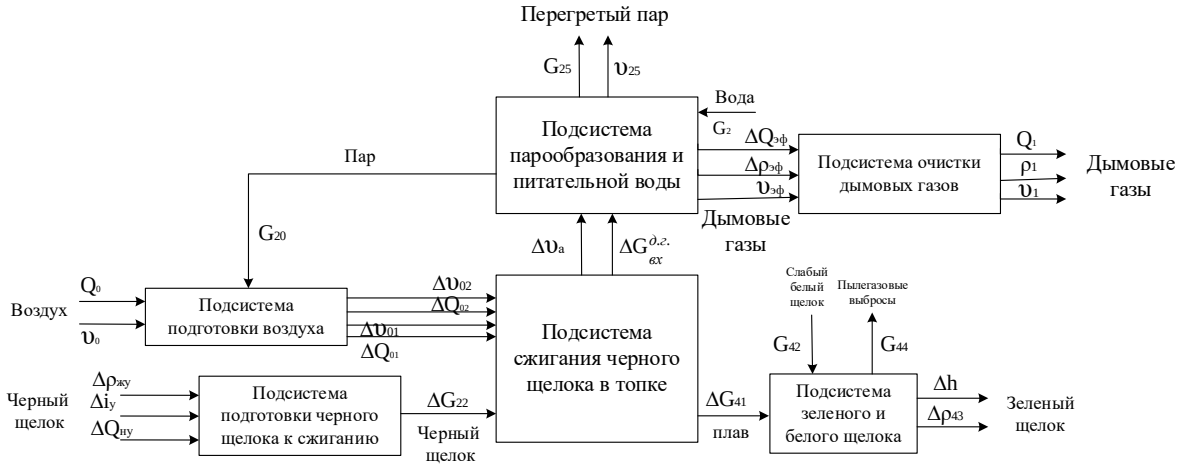


Рис. 6. Структурная схема концептуальной модели СРК

Критерий производительности зеленого щелока СРК. Производительность СРК по абсолютно сухому веществу (а. с. в.) черного щелока (до 2000 т/сут а.с.в.) и перегретому пару (до 230 т/час) оказывает существенное влияние на работу сульфат-целлюлозного производства [14-18].

Одним из ключевых показателей эффективности работы СРК является его производительность по зеленому щелоку [10, 15-18]. Ввиду этого разработка САУ качеством зеленого щелока (плотностью и концентрацией) представляет собой актуальную теоретическую и практическую задачи. Существующие САУ выполняют стабилизацию качества зеленого щелока [10], а критерием оценки эффективности системы является производительность СРК по зеленому щелоку ($\text{Пр}_{\text{з.щ.}}$), которая в первом приближении может быть сформулирована в виде:

$$\text{Пр}_{\text{з.щ.}} = \int_0^t (Q_{\text{з.щ.}} \cdot \rho_{\text{з.щ.}})dt \qquad (1),$$

где соответственно $Q_{\text{з.щ.}}$ и $\rho_{\text{з.щ.}}$ расход и плотность зеленого щелока.

Величина критерия должна быть определена на основе экспериментального или теоретического исследования процесса с учетом определенных ограничений (пределы изменения плотности и концентрации зеленого щелока, степень восстановления сульфата натрия), что является одной из задач, проводимых в дальнейшем исследований.

Заключение. Для сложного объекта управления – СРК, с применением положений системного анализа, выполнена декомпозиция

с выделением уровней и подсистем СРК, определены управляющие и возмущающие воздействия подсистем СРК, выполнена разработка концептуальной модели СРК, сформулирован критерий производительности СРК по зеленому щелоку ($Пр_{з.щ.}$).

Разработка концептуальной модели СРК является первым этапом моделирования его подсистем, и разработки общей математической модели СРК. Разработка и исследование математических моделей СРК даст возможность моделировать САУ СРК, что будет способствовать: упрощению процесса разработки специализированного программного обеспечения для СРК; снижению стоимости конечного продукта (за счет исследований значений критерия производительности СРК по зеленому щелоку) и минимизации рисков несоответствия функциональных возможностей системы производственным и экологическим требованиям [19-12].

Список литературы

1. ИТС 1-2023. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Целлюлозно-бумажное производство» (утв. Приказом Росстандарта от 26.12.2023 № 2795).

2. Абдалла Исхаг Абдалла. Разработка модели и системы управления производительностью процесса выпаривания щелоков сульфат-целлюлозного производства: специальность 05.21.03 "Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абдалла Исхаг Абдалла. Санкт-Петербург, 2003. 145 с. EDN NMNLEL.

3. Вьюков Б.Е. Исследование процесса сжигания черных сульфатных щелоков для целей управления: Дис. канд. техн. наук: 05.21.03, Ленинградская лесотехническая академия. Ленинград., 1974. 142 с.

4. Житков В.В. Исследование процесса сжигания черного щелока в топках содорегенерационных агрегатов впрыскивающего типа: Дис. канд. техн. наук / ВНИИБ. Ленинград, 1973. 230 с.

5. Смородин С.Н. Исследование топочных процессов при сжигании сульфатного щелока в вихревой топке содорегенерационного котлоагрегата с целью повышения ее эффективности: специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Смородин Сергей Николаевич. Санкт-Петербург, 2000. 112 с. EDN QDIMMN.

6. Имаев Д.Х., Станиславски В. Исследование динамики иерархических систем на примере парогенераторов. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2011. 219 с. EDN SCTSTX.

7. Вавилов А.А., Имаев Д.Х. Эволюционный синтез систем управления: Учеб. пособие. Ленинград: ЛЭТИ, 1983. 80 с.

8. Вавилов А.А. Структурный и параметрический синтез сложных систем: Учеб. пособие. Ленинград: ЛЭТИ, 1979. 94 с.

9. Ковалев Д.А. Анализ возможных нарушений технологических процессов в содорегенерационном котле // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. № 56(82). С. 108-111. DOI 10.36807/1998-9849-2020-56-82-108-111. EDN WYMCWM.

10. Доронин В.А. Автоматизация содорегенерационных агрегатов. М.: Лесная промышленность, 1988. 320 с.

11. Пожитков В.В. Математическое моделирование процессов загрязнения поверхностей нагрева содорегенерационного агрегата сульфатцеллюлозного производства с целью оптимизации их работы, Дис. канд. техн. наук: 05.21.03, Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности Ленинград: 1989. 217 с.

12. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2015. 160 с. EDN JIHIAL.

13. Осипенко У.Ю. Управление процессом получения олефинов в нештатных ситуациях: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Осипенко Ульяна Юрьевна, 2021. 200 с. EDN IIGCVG.

14. Горьковой Е.В. Диагностика состояния содорегенерационного котлоагрегата с целью повышения эффективности его работы : специальность 05.21.03 "Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины", 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Горьковой Евгений Владимирович. Санкт-Петербург, 2012. 159 с. EDN QFUFDF.

15. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. 3. Автоматизация, стандартизация, экономика и охрана окружающей среды в ЦБП. ч. 1. Автоматизация, стандартизация и экономика в ЦБП. СПб.: Политехника, 2008. 621 с.

16. Сиваков В.П., Вураско А.В., Музыкантова В.И. Регенерация химикатов и тепла в содорегенерационных котлоагрегатах. Устройство и диагностирование. Уральский ГЛТУ, 2015. С. 140.

17. Липовков И.З. Сжигание сульфатного щёлока. М.: Лесная промышленность, 1979. 128 с.

18. Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы: В 3 т. Т. 2. Производство сульфатной целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 600 с.

19. Анискин С.В. Рекуперация и очистка газовых выбросов целлюлозного производства / С.В. Анискин, В.С. Куров // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 1(397). С. 182-194. DOI 10.37482/0536-1036-2024-1-182-194. EDN FAGREG.

20. Братцева А.В. Очистка выбросов растворителя плава содорегенерационного котлоагрегата сульфатцеллюлозного производства в

конденсаторе наклонного типа : специальность 05.21.03 "Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Братцева Алена Викторовна. Санкт-Петербург, 2007. 158 с. EDN NOPQSD.

Ковалёв Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, d.a.kovalyov@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

DECOMPOSITION OF A RECOVERY BOILER AS A COMPLEX CONTROL OBJECT

D.A. Kovalev

In the course of researches the description of technological processes of recovery boiler is given, with application of system analysis the de-composition of the complex control object - recovery boiler into subsystems: preparation of black liquor for combustion, air preparation, combustion of black liquor in the furnace, steam formation and feed water, flue gas cleaning, green and white liquor is performed. Control and disturbing influences are determined for the subsystems of the recovery boiler. Development of conceptual model of recovery boiler in the form of recovery boiler structure consisting of interconnections (cause-and-effect relations) between its elements - subsystems of recovery boiler for achievement of modelling objectives is carried out. As a result of the research the criterion of green liquor productivity for recovery boiler is formulated.

Key words: recovery boiler, control and disturbing influences of recovery boiler, conceptual model of recovery boiler, green liquor productivity criterion.

Kovalev Dmitry Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, d.a.kovalyov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design

УДК 681.514
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-578-579

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВЕСКОЙ МНОГООПОРНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В.Н. Хрульков

В работе рассматривается моделирование интеллектуальной автоматизированной системы управления жесткостью гидравлической подвеской модульного тралового механизма с учетом скорости его перемещения. Данная система основывается на использовании математического аппарата нечеткой логики с применением алгоритма вывода Такаги-Сугено. Имитационное моделирование гидравлической системы модульного трала с применением многокаскадного регулятора и корректирующим регулятором давления в зависимости от скорости перемещения продемонстрировало, что при возникновении продольных и поперечных отклонений, интеллектуальная система формирует управляющие законы, позволяющие поддерживать стабильность горизонтального положения объекта регулирования с учетом особенностей перемещаемых грузов. Приведено математическое описание и кинематическая схема элемента подвески модульного трала, на основе которых была простроена имитационная модель подсистемы колесной опоры маятникового типа. Результаты моделирования интеллектуальной системы управления модульным траловым механизмом показали улучшение динамических характеристик элементов подвески платформы при стабилизации горизонтального положения перемещаемого объекта

Ключевые слова: многоопорная транспортная машина, нечеткий логический регулятор, интеллектуальная система управления, гидравлическая подвеска, имитационное моделирование

Интеллектуальные методы управления гидравлической подвеской в многоопорных транспортных машинах представляют собой актуальное направление исследований и разработок в области машиностроения и автоматизации. Эти методы позволяют значительно повысить эффективность работы транспортных средств, повысить их устойчивость и расширить возможные области их эксплуатации [1]. Гидравлические подвески обеспечивают плавное перемещение и амортизацию, что особенно важно для многоопорных машин, которые функционируют в условиях недетерминированных возмущений. Системы управления, основанные на современных интеллектуальных алгоритмах и сенсорных технологиях, способны адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации и оперативно реагировать на внешние воздействия.

Объект регулирования представляет собой многоопорный траловый механизм основными элементами, которого являются абсолютно жесткая платформа, на которую устанавливается перемещаемый крупногабаритный высокотоннажный груз, и целого набора активных гидравлических управляемых элементов подвесной системы.

Для исследования работы модульной траловой платформы в программе Autodesk Inventor была разработана 3D модель объекта состоящей

из станины и четырех опор маятникового типа. Каждая ось модульной траловой платформы оснащена двумя комплектами гидравлических систем подвески, каждая из которых отдельно соединена с станиной через поворотную опору. С помощью расширения Simscape Multibody Link Plugin для Inventor смоделированные элементы, объединённые в единую сборку, были экспортированы в модели Simscape Multibody (рис. 1) [2].

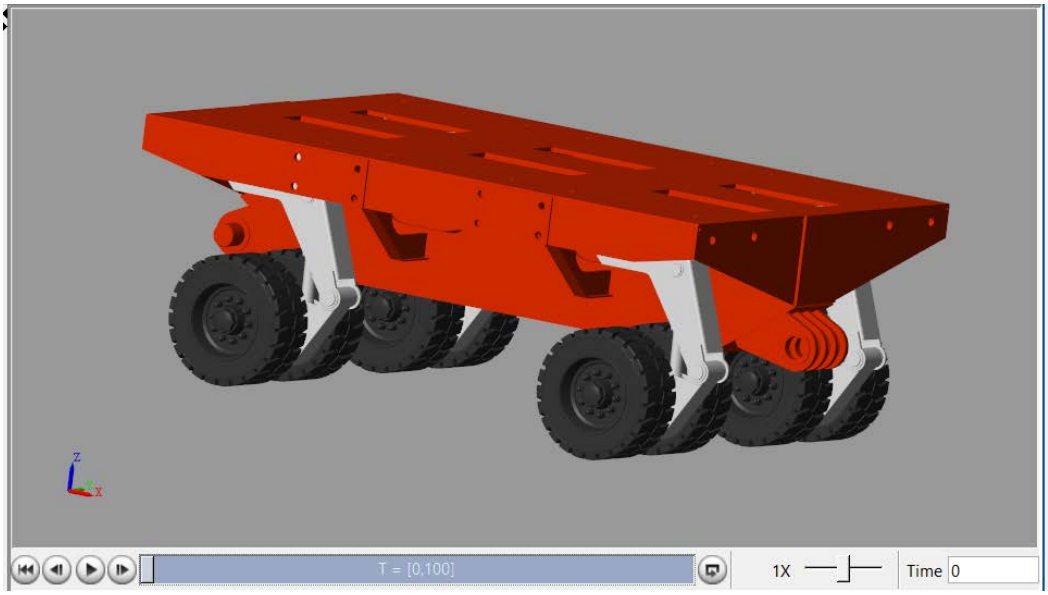


Рис. 1. 3D модель траловой платформы с 4 гидравлическими маятниковыми подвесками в Matlab

На рис. 2 представлена имитационная модель модуля траловой платформы с применением библиотек Simscape Hydraulic, Multibody и Driveline. Система управления стабилизацией транспортного модуля в пространстве реализована с применением многокаскадного нечеткого логического регулятора с двумя уровнями вложенности [3]. Имитационная модель состоит из различных подсистем, которые отвечают за следующие функции: подсистема 1 состоит из элементов библиотек Multibody и Driveline имитирующая раму/станину модульного тралового механизма, а так же редукторов и колес; подсистема 2 состоит из блоков Multibody и отвечает за функционирование маятниковой подвески; подсистема 4 состоит из гидравлического цилиндра двухстороннего действия с датчиками линейного перемещения, скорости и пропорционального гидравлического распределителя; подсистема 5 отвечает за генерацию сигнала отклонения платформы по оси абсцисс и ординат; подсистема 8 состоит из гидравлического насоса и двигателя постоянного тока.

Подсистемы подвески колесной опоры маятникового типа 2 и подсистемы гидравлического привода 4 являются ключевыми компонентами имитационной модели многоопорного тралового механизма. Основные функции этих систем является в поддержке рамы/станины и смягчении поступающих на нее возмущающих воздействий, в виде неровности дорожного покрытия и различных перегрузок.

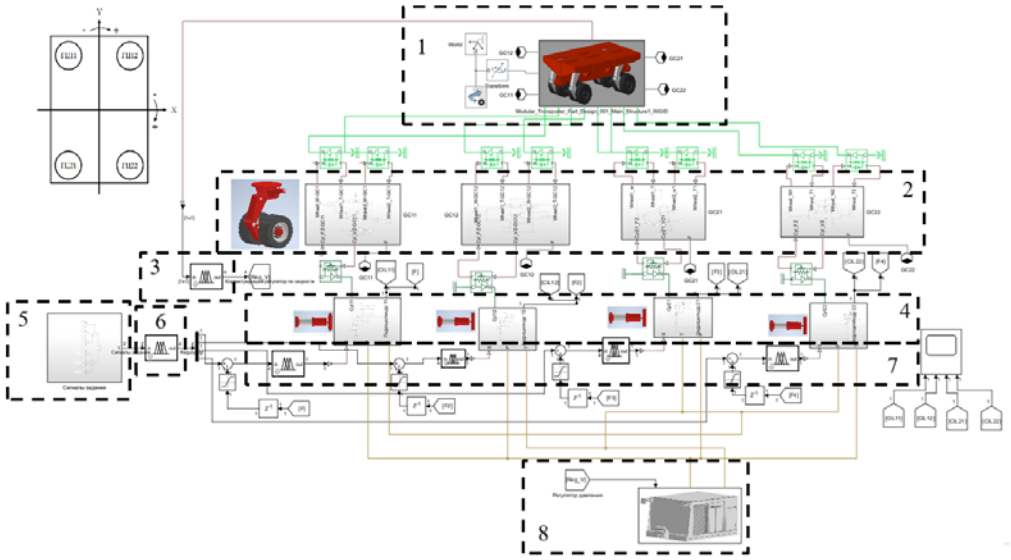


Рис. 2. Имитационная модель модуля траловой платформы с применением с многокаскадным нечетким логическим регулятором: 1 – подсистема корпуса траловой платформы; 2 – подсистемы колесной опоры маятникового типа; 3 – нечеткий логический регулятор давления гидравлической системы; 4 – подсистемы гидравлического привода; 5 – подсистема сигналов задания по отклонению платформы; 6 – нечеткий логический регулятор по контролю отклонения платформы в пространстве; 7 – локальные нечеткие логические регуляторы положения гидропривода; 8 – подсистема гидравлической станции

Подсистема одного элемента колесной опоры маятникового типа 2 используемого в расчетах приведена на рис. 3.

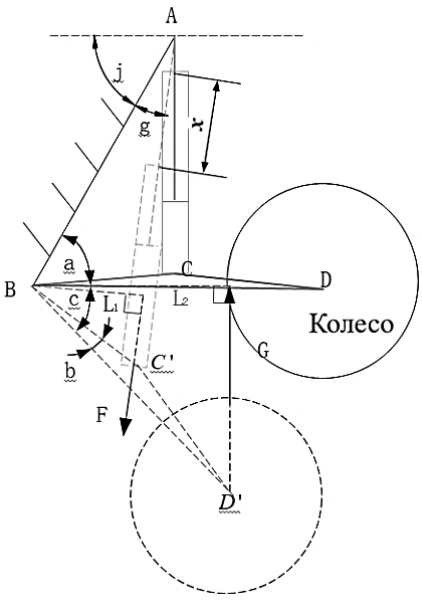


Рис. 3. Механическая схема подвески модульного трала маятникового типа

Начальный угол между рамой подвески и балансиром подвески равен a. Предполагается, что угол поворота балансира подвески относительно рамы подвески равен c, а ход соответствующего цилиндра подвески равен x. Можно получить следующее уравнение:

$$L_{AC} + x = \sqrt{L_{AB}^2 + L_{BC}^2 - 2L_{AB}L_{BC}\cos(a + c)} \quad (1)$$

В соответствии с уравнением баланса моментов подвесного механизма уравнение (2) получается следующим образом.

$$FL_1 = GL_2 \quad (2)$$

где F - усилие, прилагаемое к гидроцилиндру, G - нагрузка на каждую колесную опору маятникового типа.

В соответствии с уравнением площади треугольника можно получить уравнение (3).

$$\frac{1}{2}L_{AB}L_{BC}\sin(a + c - b) = \frac{1}{2}(L_{AC} + x)L_1 \quad (3)$$

L_1 и L_2 могут быть получены следующим образом.

$$L_1 = \frac{L_{AB}L_{BC}\sin(a+c-b)}{\sqrt{L_{AB}^2+L_{BC}^2-2L_{AB}L_{BC}\cos(a+c-b)}} \quad (4)$$

$$L_2 = L_{BD}\cos(a + c - j) \quad (5)$$

Таким образом, уравнение (2) может быть преобразовано следующим образом, которое представляет собой соотношение между усилием на каждой подвеске и усилием на одном подвесном цилиндре [4].

$$F \cdot \frac{L_{AB}L_{BC}\sin(a+c-b)}{\sqrt{L_{AB}^2+L_{BC}^2-2L_{AB}L_{BC}\cos(a+c-b)}} = G \cdot L_{BD}\cos(a + c - j) \quad (6)$$

Одним из важных параметров работы элемента подвесной гидравлической подвески трала является быстродействие рабочего органа относительно скорости перемещения объекта. Для решения данной задачи предлагается использовать метод мягкий вычислений.

Решаемая задача разработанного нечеткого логического регулятора заключается в корректировке давления в гидравлической системе в зависимости от скорости перемещения транспортировочного модуля путем увеличения скорости вращения двигателя гидравлической станции. Увеличение давления в гидравлической системе в зависимости от скорости перемещения транспортного модуля позволяет сократить время переходного процесса по положению гидравлических приводов, что может улучшить динамические свойства системы и позволит увеличить сохранность транспортируемого груза до места назначения.

При настройке нечеткого логического регулятора, корректирующего давление в гидравлической системе, для входной лингвистической переменной используются аппроксимированные функции принадлежности треугольной формы, которые равномерно распределены в диапазоне 0 до 15 км/ч (соответствующему максимальной скорости перемещения), с пересечением треугольников при значении степени принадлежности 0,5, что удовлетворяет правилу разбиения единицы.

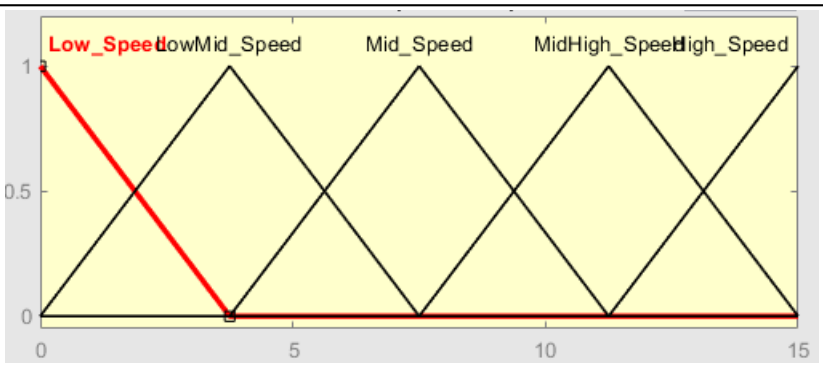


Рис. 4. Входная лингвистическая переменная нечеткого логического регулятора

База знаний нечеткого логического регулятора корректирующего давление в гидравлической системе состоит из 5 правил и имеет следующий вид:

1. If (Speed is Low) then (output1 = 0);
2. If (Speed is LowMid_Speed) then (output1 = 4);
3. If (Speed is Mid_Speed) then (output1 = 6);
4. If (Speed is MidHigh_Speed) then (output1 = 8);
5. If (Speed is High_Speed) then (output1 = 10).

Значение выходной переменной с учетом полученной базы правил для нечеткого логического регулятора, отвечающего за корректировку рабочего давления в зависимости от скорости перемещения транспортного модуля имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{z=1}^{5} \Lambda_z(V_z(Sp))x_z}{\sum_{z=1}^{5} x_z} \quad (7)$$

где Λ_z – операция минимума, предназначенная для определения уровня отсечения нечеткой переменной для соответствующего нечеткого правила; V – входные функции принадлежности треугольной формы; z – номер правила в базе знаний; x – выходные константы; Sp – сигнал с датчика скорости перемещения траловой полуплатформы, км/ч.

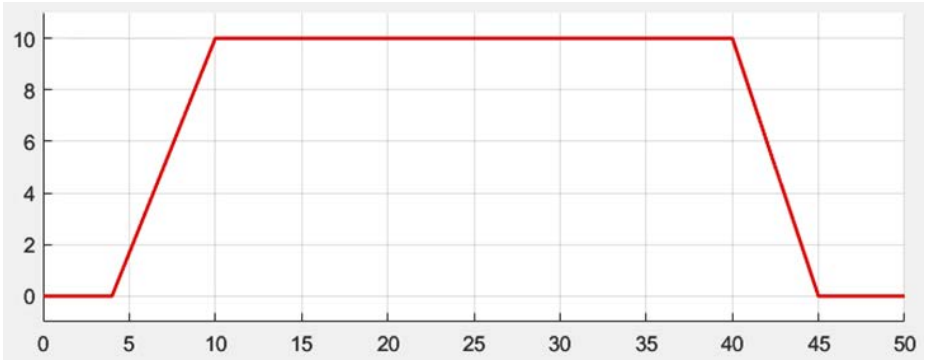


Рис. 5. Форма входного сигнала, поступающий на нечеткий логический регулятор в км/ч

На систему управления поступают следующие значения поперечного отклонения: X = +4° - интервал времени с 15 до 20 секунд; X = -3° -

интервал времени с 25 до 30 секунд; X = +5° - интервал времени с 35 до 40 секунд. Реакция системы на поступающие сигналы представлены на рис. 6 и рис. 7.

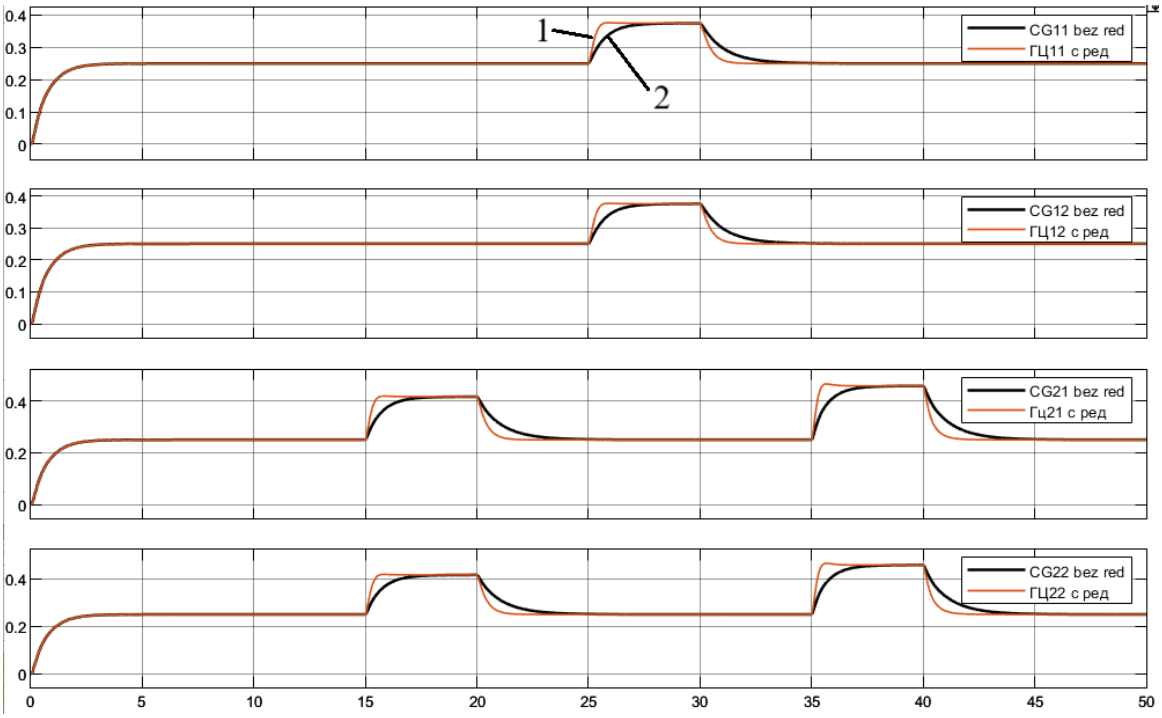


Рис. 6. Графики переходных процессов по положению гидропривода при движении транспортной платформы со скоростью 10 км/ч по ровной поверхности: 1 – скорректированный сигнал с учетом скорости перемещения; 2 – нескорректированный сигнал без учета скорости перемещения

Переходные процессы, полученные в результате моделирования, представленные на рис. 6 и рис. 7 можно интерпретировать следующим:

При возникновении по оси абсцисс отклонения X=+4° в момент времени 15 секунд нечеткий логический регулятор второго уровня вложенности синтезирует сигнал управления для гидроприводов 21 и 22 выдвинуть штоки цилиндров для выравнивания платформы в горизонте. Гидроцилиндры 11 и 12 находятся в среднем положении соответствующие 0,25 м. После постепенного уменьшения отклонения по оси абсцисс в момент времени 25 секунд гидропривода 21 и 22 возвращаются в исходное состояние равному 0,25.

При возникновении по оси абсцисс отклонения X = - 4° в момент времени 25 секунд нечеткий логический регулятор второго уровня вложенности синтезирует сигнал управления для гидроприводов 11 и 12 выдвинуть штоки цилиндров для выравнивания платформы в горизонте. Гидроцилиндры 21 и 22 находятся в среднем положении соответствующие 0,25 м. После постепенного уменьшения отклонения по оси абсцисс в момент времени 30 секунд гидропривода 11 и 12 возвращаются в исходное состояние равному 0,25.

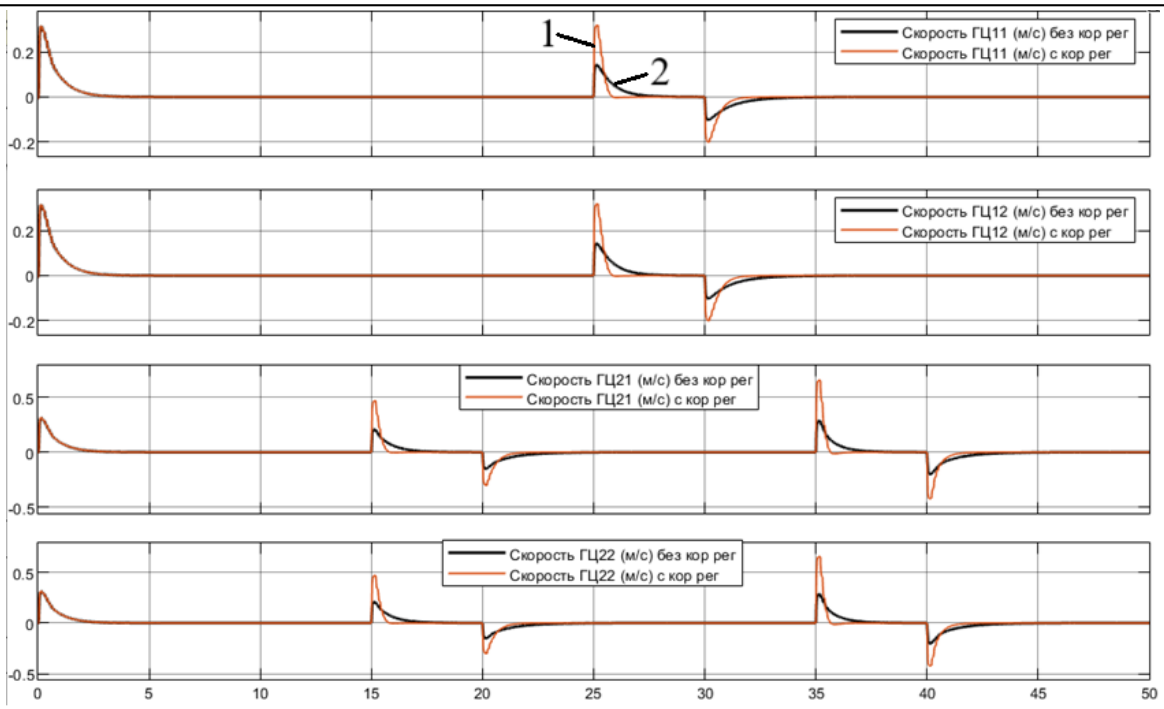


Рис. 7. Графики переходных процессов по скорости гидроприводов при движении транспортной платформы со скоростью 10 км/ч по ровной поверхности: 1 – скорректированный сигнал с учетом скорости перемещения; 2 – нескорректированный сигнал без учета скорости перемещения

Так же на графиках переходных процессов по скорости и положению гидропривода наглядно видно, что при движении платформы со скоростью в 10 км/ч корректирующий регулятор увеличивает давление в гидравлической системе, тем самым повышая быстродействие рабочего органа. Тем самым улучшая динамические свойства модульного тралового механизма.

Список литературы

1. Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления / А. А. Богуславский, Г. К. Боровин, В. А. Карташев [и др.]. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2019. 228 с.

2. Kenan Li. Multibody dynamic simulation with Simscape: methods and examples. Polytechnic university of Turin, 2021. 53 p.

3. Черный С.П. Моделирование многокаскадного нечёткого логического регулятора для управления многосоставным траловым механизмом на основе оператора сложения / С. П. Черный, В. Н. Хрульков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 5(69). С. 53-60. DOI 10.17084/20764359-2023-69-53. EDN BKIWEA.

4. Wang, Jianjun Research and Improvement of the Hydraulic Suspension System for a Heavy Hydraulic Transport Vehicle / Jianjun Wang, Jingyi Zhao, Wenlei Li, Xing Jia and Peng Wei // Applied Sciences. 2020. vol. 10. №. 5220.

5. Колёсные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет / Под общ. ред. Б.Н. Белоусова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 728 с.

6. Черный С.П. Моделирование многокаскадного нечеткого логического регулятора для стабилизации модульного тралового механизма / С. П. Черный, В. Н. Хрульков, Б. Я. Мокрицкий // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 11. С. 126-132. DOI 10.17513/snt.40218. EDN KMGSTW.

7. Cherniy S.P. Modeling of an Advanced Fuzzy Logic Controller with Elementary Links in the Internal Cascade / S. P. Cherniy, V. I. Susdorf, A. V. Buzikayeva // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. Vladivostok, 2020. P. 9271136. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271136. EDN LQOSKP.

8. Щерба В.Е. Гидравлика и гидропривод: практикум / В.Е. Щерба, Е.А. Павлюченко, Е.Ю. Носов, А.В. Григорьев. Омск: ОмГТУ, 2020. 187 с.

9. Кудинов Ю.И. Нечеткие регуляторы и системы управления / Ю.И. Кудинов, И.Н. Дорохов, Ф.Ф. Пащенко // Проблемы управления. 2004. № 3. С. 2 – 14.

10. Максимова Н.А. Применение технологии многокаскадного нечеткого управления для электроприводов постоянного тока / Н. А. Максимова, С. П. Черный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2020. № 4(25). С. 50-54. EDN KGIXBI.

11. Dadios E. Fuzzy Logic - Algorithms. Techniques and Implementations: монография. М.: ИнТех, 2012. 294 с.

Хрульков Владимир Николаевич, старший преподаватель, vova_hrulkov@mail.ru, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

DEVELOPMENT OF A SUSPENSION CONTROL SYSTEM MODEL FOR A MULTI-SUPPORT TRANSPORT VEHICLE USING THE THEORY OF SOFT COMPUTING

V.N. Khrulkov

The paper considers the modeling of an intelligent automated stiffness control system for a hydraulic suspension of a modular trawl mechanism, taking into account the speed of its movement. This system is based on the use of the mathematical apparatus of fuzzy logic using the Takagi-Sugeno inference algorithm. Simulation modeling of the hydraulic system of a modular trawl using a multistage regulator and a corrective pressure regulator depending on the speed of movement demonstrated that when longitudinal and transverse deviations occur, the intelligent system generates control laws that allow maintaining the stability of the horizontal position of the regulated object, taking into account the characteristics of the loads being moved. A mathematical description and kinematic scheme of the suspension element of a modular trawl are given, on the basis of which a simulation model of a pendulum-type wheel bearing subsystem was constructed. The simulation results of an intelligent control system for a modular trawl mechanism showed an improvement in the dynamic characteristics of the platform suspension elements while stabilizing the horizontal position of the object being moved.

Key words: multi-support transport vehicle, fuzzy logic controller, intelligent control system, hydraulic suspension, simulation.

Khrulkov Vladimir Nikolaevich, senior lecturer, vova_hrulkov@mail.ru, Russia, Komsomolsk-na-Amur, Komsomolsk-na-Amure State University

УДК 621.341.572
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-586-587

ОПТИМАЛЬНАЯ СХЕМА ДРАЙВЕРА ТРАНЗИСТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Н.К. Третьяков, В.Е. Кузнецов

Рассмотрены преимущества и недостатки различных схемы реализации драйверов транзисторов импульсных источников питания с точки зрения объективности и целесообразности практического применения. Приведено обоснование выбранных схем реализации драйверов путем анализа необходимых функциональных требований, а также типов применяемых транзисторов. Приведены результаты практических измерений работы интеллектуального драйвера в составе стенда и бустрепной схемы управления в составе преобразователя вентилятора мощностью 2 кВт.

Ключевые слова: драйвер, транзистор, защита, импульсный преобразователь, короткое замыкание.

Современное развитие электронной компонентной базы (ЭКБ) и технических решений позволяет проектировать импульсные преобразователи электроэнергии различной сложности, надежности, функциональных возможностей, а также конечной себестоимости. Одними из ключевых элементов импульсного преобразователя являются управляемые полупроводниковые компоненты – транзисторы, выполняющие функции коммутации силовых цепей с определенным, заданными, параметрами и защиты устройства в целом при возникновении нештатных ситуаций – коротких замыканий (КЗ) и перегрузок.

Стоит отметить, что в работе, авторы рассматриваю преобразователи, работающие в среднем диапазоне напряжений (400-900 В) и импульсном режиме с повышенной частотой переключений (5-20 кГц) в режим широтно-импульсной модуляции (ШИМ), при котором формируются импульсные последовательности, состоящие из импульсов с фиксированной частотой и изменяемой длительностью [1]. В работе рассматриваются драйверы, имеющие встроенную гальваническую развязку цепей.

Для корректного управления транзисторами применяют драйверы, которые преобразуют входной логический сигнал (последовательность импульсов) от микроконтроллера системы управления (после, как правило, логических элементов) в сигнал с определенным уровнями напряжения в зависимости от применяемых транзисторов, т. е. выполняет функцию усилителя, а также защиты.

Таким образом, целью данной работы является рассмотрения и исследование вопросов корректности и необходимости применения различных типов и схем драйверов транзисторов в зависимости от специфики импульсного преобразователя.

Для достижения поставленной цели был выполнен ряд практических испытаний с измерением параметров работы интеллектуального драйвера IGBT в составе разработанного стенда, и бутстрепной схемы драйверов SiC MOSFET транзисторов в составе преобразователя частоты вентилятора мощность 2 кВт.

Схемы драйверов. Авторы работы считаю, что основным критерием корректного разделения драйверов являются наличия или отсутствие встроенных функций. Так драйверы возможно разделить на интеллектуальные (англ. smart), которые имеют собственные функции и алгоритмы защиты, внедряемые в общую систему управления и стандартные, которые обеспечивают гальваническую развязка так же, как и первые. Например, к наиболее распространенным функциям интеллектуальных драйверов относятся: защита по насыщению (англ. desat), плавное отключение (англ. shutdown), контроль напряжения питания (англ. undervoltage Lock Out – UVLO) и др. При использовании стандартных двухканальных драйверов, как правило, их внедряют в бутстрепную схему, которая позволяет применять один источник питания, для формирования необходимых уровней напряжения [3-6].

Для большей наглядности отличий, а следовательно, и разницы в практической реализации на рис. 1 представлены схемы драйверов для двух последовательно соединённых транзисторов (полумостовая схема).

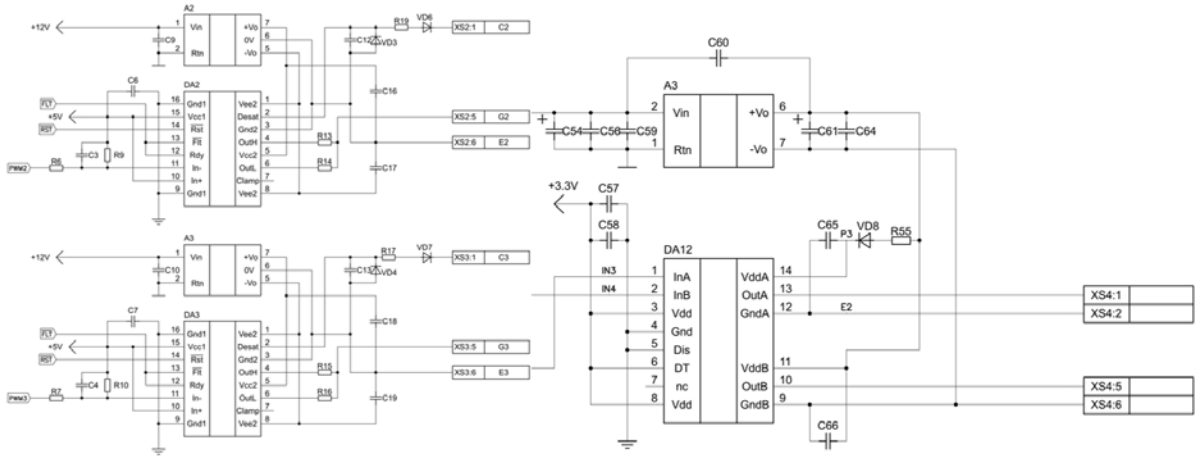


Рис.1. Схема двухканального интеллектуального драйвера (слева) и стандартного бутстрепного драйвера (справа)

Следовательно, исходя из схем, вторым критерием разделения драйверов является возможность формирования двухполярного напряжения. Бесспорно, возможно применять стандартный двухканальный драйвер с двумя источника напряжения на каждый канал, которые позволят формировать двухполярное напряжение, но данной решений не имеет широкого

применения и относиться к специализированным задачам, имеющим значительные ограничения по применяемым компонентам. Так же, согласно рис. 1. наблюдается разница в количестве компонентов, которая обусловлена наличие встроенных функций драйвера [7].

Транзисторы. При проектирование импульсных преобразователей применяются следующие типы транзисторов: IGBT, MOSFET (для низковольтных преобразователей), SiC MOSFET и GaN транзисторы. GaN-транзисторы являются наименее распространенными и наиболее дорогими, вследствие чего в данной работе они не рассматриваются.

Для безопасного управления IGBT необходимо формировать двухполярное напряжение (+15/-8 В) и контролировать параметры эксплуатации: максимальное напряжение коллектор-эмиттер и падение напряжения открытого канала. Стоит отметить, что при КЗ, IGBT необходимо плавно отключать, чтобы уменьшает выброс напряжения и эффект Миллера соответственно – рост напряжения затвор-эммитер, что может «приоткрывать» транзистор [8]. Согласно графику (рис. 2), приведенном в описании на IGBT, плавное выключение так же позволяет ограничить ток коллектора.

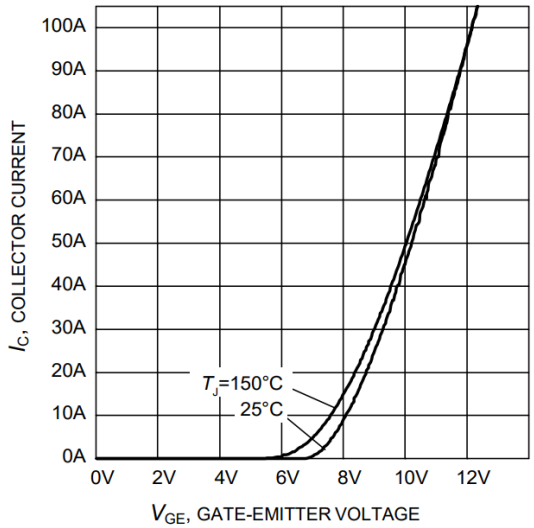


Рис. 2. График зависимости ток коллектора от напряжения затвора IGBT

Таким образом, при использовании IGBT необходимо применять интеллектуальный драйвер, имеющий встроенные функции защиты и двухполярное напряжение [9-12]. На рис. 3 приведены осциллограммы напряжений затвора IGBT транзистора, подключенного к интеллектуальному драйверу в нормальном режиме эксплуатации и при срабатывании защиты с различной временной разверткой, для наглядности режима плавного выключения.

В случае применения SiC MOSFET, вопрос выбора драйвера не имеет однозначного решения, как в случае IGBT. Первые серийной доступные SiC с ценой соизмеримой с IGBT требовали двухполярного напряжения (+18/–5 В и схожих значений). Современные SiC транзисторы позволяют применять однополярное управления (рис. 4) [13, 14].



Рис. 3. Осциллограммы напряжения затвора IGBT с интеллектуальным драйвером в различных режимах эксплуатации

Table 6 Switching characteristics, Inductive load [4]

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	max.	
MOSFET Characteristics, T_{vj} = 25°C						
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	V_{DD} = 800V, I_D = 25A, V_{GS} = 0/18V, $R_{G,ext}$ = 2Ω, L_σ = 40nH, diode: body diode at V_{GS} = 0V see Fig. E	-	7	-	ns
Rise time	t_r		-	19	-	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	17	-	
Fall time	t_f		-	13	-	
Turn-on energy	E_{on}		-	366	-	µJ
Turn-off energy	E_{off}		-	80	-	
Total switching energy	E_{tot}		-	446	-	
Body Diode Characteristics, T_{vj} = 25°C						
Diode reverse recovery charge	Q_{rr}	V_{DD} = 800V, I_{SD} = 25A, V_{GS} at diode = 0V,	-	320	-	nC

Symbol	Parameter		Value	Unit
V_{DSmax}	Drain - Source Voltage		750	V
V_{GSmax}	Gate - Source Voltage		-8/+19	V
I_D	Continuous Drain Current, V_{GS} = 15 V	T_C = 25°C	156	A
		T_C = 100°C	112	
$I_{D(pulse)}$	Pulsed Drain Current, Pulse width t_p limited by T_{jmax}		419	A
P_D	Power Dissipation, T_C=25°C, T_j = 175 °C		554	W
T_j, T_{stg}	Operating Junction and Storage Temperature		-55 to +175	°C
T_L	Solder Temperature, 1.6mm (0.063") from case for 10s		260	°C

Note (1): Recommended turn off / turn on gate voltage $V_{GS(op)}$ -4V...0V / +15V
Note (2): Verified by design

Рис. 4. Допустимые параметры эксплуатации SiC транзисторов фирм Infineon (слева) и Cree (справа)

Стоит отметить, что производители рекомендую применение двухполярного напряжения управления в случае применения систем повышенной надежности. Согласно паспортным данным, SiC лишены большинства недостатков IGBT, что позволяет применять стандартные драйверы, которые должны выполнять функцию гальванической развязки и соответствовать требования по значению выходного импульсного тока, потребляемого при подаче напряжения на затвор транзистора через резистор.

Применение бутстрепной схемы. Согласно проведённому анализу, допустимо заключение о выборе типа драйвера к определенному транзистору: IGBT-интеллектуальный драйвер, SiC-стандартный, обеспечивающий функцию гальванической развязки. Кроме того, отдельного внимания, требует вопрос экономической составляющей, т. к. себестоимость применения интеллектуального драйвера в разы превышает бутстрепную схему со стандартным драйвером. Наибольший недостаток применения второго драйвера – отсутствие двухполярного напряжения, подаваемого на затвор транзистора. Решение данного недостатка описано в Application Note AN-978 [15], где подробно описана возможность преобразована однополярного напряжения, подаваемого на затвор транзистора в двухполярное (рис. 5 слева). Но, данное решение так же имеет значительный недостаток – появление задержки формирования импульса напряжения, что в случае высокочастотных преобразователей может иметь критический характер. Например, преобразователь, работающий на частоте 100 кГц, имеет период ШИМ 10 мкс и с учетом задержки формирования импульса (рис. 5 справа) 5 мкс

теряет практически на 50% регулирования, что так же соответствует потере максимальной выходной мощности.

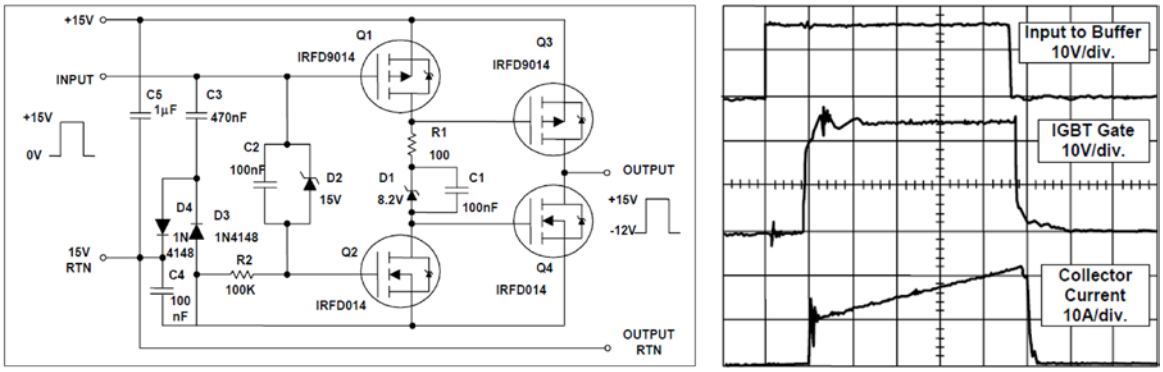


Рис. 5. Схема (слева) и осциллограммы работы (справа) формирования двухполярного напряжения от однополярного источника

При проведении исследования авторами статьи был разработан стенд для оценки корректности бутстрепного драйвера, включающий в себя статический преобразователь (выходное напряжение имеет синусоидальную форму) и инертную нагрузку в виде вентилятора мощностью 2 кВт. При проведении испытаний в номинальных режимах работы система управления система управления корректно выполняла все необходимы е функции.

Необходимо отметить, что бутстрепная схема имеет важную отличительную особенность управления – заряд емкости верхнего канала транзистора (С85 рис. 1) возможет только при открытом нижнем транзисторе, т. к. ток, протекающий через нижний ключ, выполняет заряд емкости верхнего канала. Т. е. необходимо своевременно выполнять открытие нижнего ключа и/или в режиме ожидание держать полностью открытым. Данный алгоритм работы критически важен при применении данной схемы, т. к. отсутствие данного механизма управления может привести к выходу из строя всего преобразователя. Данную особенность необходимо учитывать при проектирование системы управления. На рис. 6 приведены осциллограммы выходного тока преобразователя в аварийном режиме – срабатывание защиты, при котором необходимо мгновенное отключение формирование выходного напряжения. При срабатывании защиты нижние транзисторы полумостов переключаются в открытое состояние, верхние закрыты. Так как асинхронный электродвигатель имеет ЭДС, при переключении транзисторов на общий потенциал (минусовую шину звена постоянного тока) происходит выброс тока, который протекает через внутренние диоды транзисторов, что может привести к перегреву и/или пробою по напряжению, а соответственно и выходу из строя всего устройства.

Таким образом, корректность применения бутстрепной схема в рамках задачи проектирования преобразователей частоты имеет спорный характер, т. к. данное решение имеет значительные недостатки. Применении интеллектуально драйвера позволяет управлять транзисторами полумоста независимо (одновременной отключение всех транзисторов), что позволит избежать выше представленных процессов.

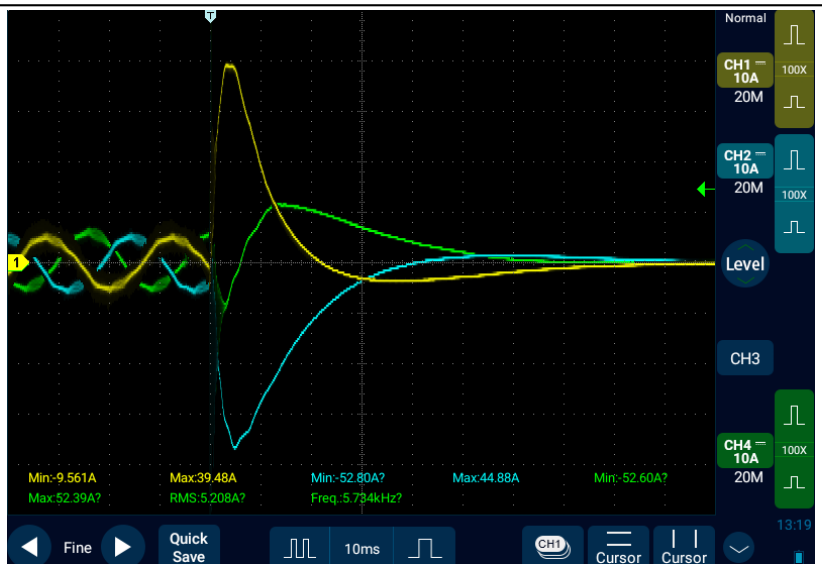


Рис. 6. Осциллограммы выходного тока преобразователя с бутстрепной схемой драйверов при срабатывании защиты

Заключение. Согласно результатам проведенного исследования, применение интеллектуального драйвера для управления IGBT транзисторами необходимо для поддержания номинальных режимов работы. Применение бутстрепной схемы является более экономичным вариантом, но несет в себя ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании системы управления и имеющих критический характер при применении в преобразователях частоты с инертной нагрузкой.

Решение выбора оптимальной схемы драйвера и системы управления в проведенном исследовании является одним из множества возможных, которые непосредственно влияют на экономичность и работу устройства в различных режимах.

Дальнейшее развитие исследования направлено на более глубокое изучение возможных вариантов реализаций схем драйверов транзисторов и изучению вопроса исключения описанных в исследовании недостаток работы.

Список литературы

1. Третьяков Н.К. Проектирование источников переменного напряжения с использованием современных решений / Н.К. Третьяков, В.П. Кузьменко, О. Я. Соленая // Практическая силовая электроника. 2024. № 1(93). С. 40-45.

2. Третьяков Н.К. Проектирование импульсных источников питания с использованием МДП-транзисторов производства КНР / Н. К. Третьяков, В. П. Кузьменко, О. Я. Соленая // Практическая силовая электроника. 2024. № 2(94). С. 33-37.

3. Гавриков В. Влияние КЗ на работу IGBT в системе электропривода / В. Гавриков, К. Автушенко // Силовая электроника. 2014. Т. 5, № 50. С. 68-72.

4. Новиков П. IGBT-драйвер в свете защиты транзистора / П. Новиков // Силовая электроника. 2019. № 3(78). С. 20-23.

5. Крапп Й. Защитные функции современных драйверов IGBT / Й. Крапп, А. Колпаков // Силовая электроника. 2010. № 28. С. 41-44.

6. Файел А. Механизмы отказов MOSFET в мостовых импульсных источниках питания с переключениями при нулевом напряжении (ZVS) / А. Файел, Т. Ву // Компоненты и технологии. 2014. № 9(158). С. 95-99.

7. Колпаков А. Управление карбидом кремния: драйвер для модуля SiC MOSFET 62 мм // Силовая электроника. 2021. № 6(93). С. 22-26.

8. Ламп И. Седьмое поколение IGBT в трехуровневых преобразователях. Часть 2 / И. Ламп, А. Колпаков // Силовая электроника. 2021. № 5(92). С. 34-39.

9. Зейников А. Управление SiC MOSFET с помощью драйверов затвора с оптической развязкой ACPL-W346 и ACPL-339J // Силовая электроника. 2020. № 5(86). С. 32-36.

10. Transistor aging minimization method for multi output level converter design / H. Kostanyan, S. Harutyunyan, G. Voskanyan, S. Ghukasyan // Вестник Российско-Армянского (Славянского) университета: физико-математические и естественные науки. 2022. No. 1. P. 89-100. DOI 10.48200/1829-0450_pmn_2022_1_89.

11. Клабуков И.П. Перспективы массового применения GAN-транзисторов в источниках вторичного электропитания // Вектор развития. 2023. № 12. С. 33-39.

12. Son M. Active Gate Driver With Turn-off Delay Control for Voltage Balancing of Series–Connected SiC MOSFETs / M. Son, Y. Cho, S. Baek // IEEE Transactions on Power Electronics. 2022. Vol. 37, No. 12. P. 14575-14586. DOI 10.1109/tpel.2022.3188747.

13. IMW120R030M1H. [Электронный ресурс] URL: https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/silicon-carbide/discretes/imw120r030m1h (дата обращения: 25.10.2024).

14. E4M0015075J2. [Электронный ресурс] URL: https://assets.wolfspeed.com/uploads/2024/04/Wolfspeed_E4M0015075J2_data_sheet.pdf (дата обращения: 25.10.2024).

15. Application Note AN-978. [Электронный ресурс] URL: https://www.leocom.kr/datasheets/55674_307595.pdf (дата обращения: 28.10.2024).

Третьяков Никита Константинович, аспирант, nktretyakov@stud.etu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),

Кузнецов Владимир Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, vekuznetcov@etu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

OPTIMAL TRANSISTOR DRIVER CIRCUIT FOR PULSED-SPEED POWER SUPPLIES

N.K. Tretiakov, V.E. Kuznetsov

The advantages and disadvantages of various schemes for implementing transistors of pulse power supplies are considered from the point of view of objectivity and expediency of practical application. The rationale for the selected schemes for implementing drivers is given by analyzing the necessary functional requirements, as well as the types of transistors used. The results of practical measurements of the operation of an intelligent driver as part of a stand and a bootstrap control circuit as part of a 2-kW fan converter are given.

Key words: driver, transistor, protection, pulse converter, short circuit.

Tretyakov Nikita Konstantinovich, postgraduate, nktretyakov@stud.etu.ru, Russia, Saint Petersburg, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI",

Kuznetsov Vladimir Evgenievich, doctor of technical sciences, professor, vekuznetcov@etu.ru, Russia, Saint Petersburg, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-594-595

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАГРЕВА МУФТ ИЗ МЭПФ

И.А. Донюков, И.В. Поцебнева

В работе рассматриваются особенности использование муфт из материала с эффектом памяти формы (МЭПФ) для монтажа фермовых конструкций, разворачиваемых на орбите Земли. Особое внимание уделяется исследованию влияния скорости нагрева на степень возврата формы муфт. В результате проведенного исследования было установлено, что с ростом скорости нагрева возрастают степень возврата формы и развиваемые усилия, а, следовательно, и прочность термомеханического соединения (ТМС). Все теоретические результаты, полученные в работе, подтверждены экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: степень возврата формы, скорость нагрева, напряжение возврата, усилие разрыва соединений.

Фермы входят в конструкции большинства космических аппаратов (КА) и носителей. Их используют для соединения отсеков (блоков), подвески двигателей, крепления крупногабаритных объектов (телескопов и т.п.), рам с приборами и т.д. Такие фермы доставляются на орбиту вместе с КА, в конструкции которых они входят. Развитие космических систем предполагает использовать ферменные конструкции для соединения между собой целых модулей. Такие фермы могут достигать размеров в несколько десятков метров. Их элементы предполагают полностью изготавливать на Земле и в компактном виде доставлять на орбиту. На орбите такие фермы могут быть либо развернуты, либо собраны из отдельных элементов.

В ряде разрабатываемых и осуществляемых проектов космических конструкций крупногабаритные фермы протяженностью до тысячи метров предполагается изготавливать на орбите, в условиях космоса. Примером может служить конструкция антенны радиометр диаметром 100 метров фирмы "Martin Marietta" [1]. Диаметры антенн солнечных электростанций или ретрансляторов энергии и одного пункта поверхности в другой могут достигать 1 км [1,2].

Ферменную конструкцию имеют космические платформы, на которых размещаются стандартные блоки и модули [3], а также долговременные орбитальные станции (ДОС) и операционные центры.

Существует ряд проектов полного изготовления ферм на орбитах, включая изготовление отдельных элементов и сборку их с помощью фермопостроителей и автоматических сборочных аппаратов [3,4].

Базовые элементы ферм предполагается изготавливать не только из металлов, но и из композиционных материалов (КМ).

Следует отметить, что автоматизация процесса изготовления ферм на орбите далеко не всегда экономически оправдана, так как она требует разработки, изготовления и выведения на орбиту сложных устройств, требующих высококвалифицированного обслуживания.

Большинство крупногабаритных ферм предполагается собирать из трубчатых элементов, диаметры которых могут достигать 80 – 100 мм, и фитингов, изготавливаемых на Земле и доставляемых в компактном виде на орбиту. Задачей космонавта при сборке является установка с помощью приспособления в правильное взаимное положение соединяемых элементов, монтаж инструмента, предназначенного для выполнения соединения, включение и выключение его, перестановка на следующее место соединения и т.д.

Одним из наиболее перспективных способов соединения элементов ферм является использование муфт из материала с эффектом памяти формы (МЭПФ), которое получило название термомеханического соединения (ТМС). Для образования ТМС необходим нагрев муфт до температуры полного протекания обратного превращения. При этом муфта должна полностью реализовать заложенную (заданную) степень возврата формы, обеспечив тем самым требуемую прочность соединения.

Показателем надежности ТМС, используемых для сборки ферм в условиях космоса, является прочность соединения на разрыв.

В качестве материала муфт используется эквиатомный нитинол ТН-1 (50% Ni и 50% Ti). Выбор данного материала определен его свойствами:

– Температурный интервал обратного превращения составляет 95 – 105°С [5]. Температуры этого интервала увеличиваются на 40 – 50°С при задании предварительной деформации и возврате ее под напряжением (муфта при нагреве обжимает элементы, преодолевая их сопротивление сжатию).

– Реализуемая степень возврата формы 8,5 ± 10% - одна из самых высоких среди всего класса МЭПФ. Предельная деформация растяжения, при которой наблюдается полное восстановление формы, не превышает 6 – 8%.

– Напряжения, развиваемые при восстановлении формы и составляют 500 – 700 МПа [6].

Следует отметить, что МЭПФ, находящиеся под напряжением в процессе прохождения через интервал фазового превращения (как при нагреве, так и охлаждении) испытывают явление ползучести, вследствие которого происходит накопление деформации в направлении нагрузки на начальной стадии нагрева. Это явление ползучести при многоцикличском нагружении приводит к необратимому формоизменению [6,7]. При одно-

цикловом нагреве дополнительная деформация, вызванная ползучестью, запоминается МЭПФ и при достижении температуры конца обратного превращения полностью восстанавливается. На основании этого и был сделан вывод о не влиянии скорости нагрева на степень возврата формы и развиваемые напряжения [7].

Однако, если МЭПФ должен реализовать предельную деформацию (например, для сплава ТН-II-8%), то явление ползучести на начальной стадии нагрева увеличит эту деформацию (если рассматривается растяжение проволоки - увеличит ее длину). При достижении же температуры конца обратного превращения длина проволоки (или диаметр муфты) уменьшается на те же 8%, но уже не от первоначальной, а от общей длины, получившейся с добавлением деформации, вызванной ползучестью. Таким образом полного восстановления формы не получится. Вследствие этого, при выполнении ТМС, прочность соединения уменьшится.

Явление ползучести также приводит к частичной, а иногда и к полной (если усилия, развиваемые МЭП, недостаточны для преодоления сопротивления нагрузки) релаксации напряжений возврата [7,8].

Можно полагать, что уменьшить величину дополнительной деформации, вызванной ползучестью, возможно за счет увеличения скорости нагрева.

В настоящей статье приводятся результаты исследования влияния скорости нагрева на степень возврата формы и развиваемые усилия возврата, а также определения оптимальных режимов нагрева для получения заданной прочности ТМС.

Исследование влияния скорости нагрева на степень возврата формы. Для определения зависимости величины степени возврата формы от скорости нагрева при различных значениях нагрузки были проведены эксперименты, для чего была собрана установка, схема которой представлена на рис. 1.

Образцы проволоки из сплава ТН-1 сечением 1 мм^2 пластически деформировались (растягивались) на 4 и 8%, а затем устанавливались по схеме, показанной на рис. 1. Верхний конец образцов закреплялся неподвижно, а к нижнему концу прикреплялся подвес 6 с грузами, масса которых составляла 2; 25; 50 и 60 кг. При этом напряжения сопротивления возврата формы, соответственно, составили 20; 250; 500 и 600 МПа. Предельная масса груза 60 кг выбрана соответствующей максимальному напряжению возврата (600 МПа), развиваемому материалом проволоки.

Нагрев проволоки осуществлялся от блока питания 4 со стабилизированным напряжением.

Как показали эксперименты (рис. 2) при напряжениях сопротивления возврата формы 20 и 250 МПа эффект ползучести сказывается незначительно (рис. 2 а и б). Возврат формы (восстановление длины) проволоки происходит практически полностью, даже при времени нагрева 2.5 мин, что соответствует скорости нагрева 1 град/ мин. В этих экспериментах удлинение (начальная деформация) проволоки составляла 8%.

При напряжениях сопротивления возврата формы 500 и 600 МПа эффект ползучести в значительной степени влияет на степень возврата формы. Полного возврата формы не происходит даже при быстром нагреве за 3 и 1.5 сек (рис. 2 в и г).

Эксперименты, нагрев в которых продолжался до полного возврата формы, показали, что величина степени возврата формы у этих образцов хотя и выше, чем у подобных, но нагретых до температуры конца обратного превращения (рис. 2 г), полного восстановления формы (длины) не происходит. Так, при скорости нагрева 6 град/сек возврат формы у образцов с начальной деформацией 8% при нагрузке 600 МПа, нагретых до температуры конца обратного превращения и до прекращения возврата формы, составил 6,5% и 6,7%, соответственно.

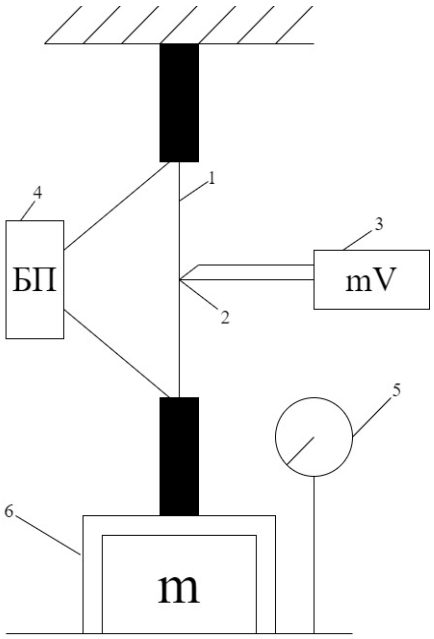
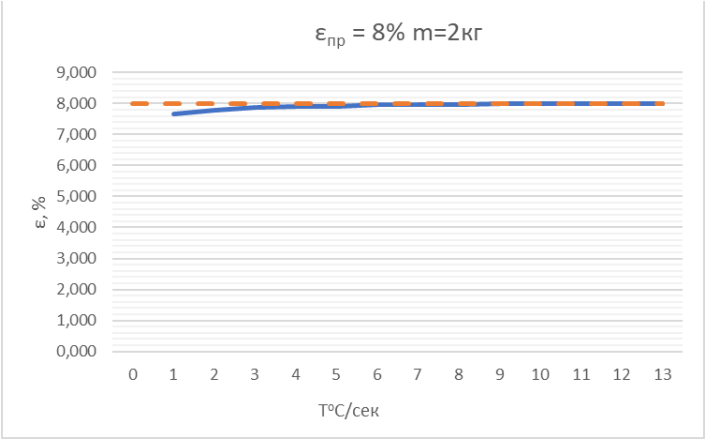
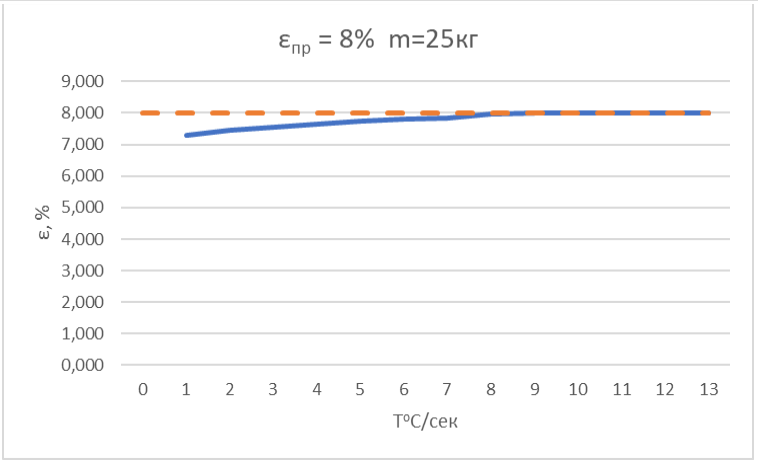


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – проволока из сплава ТН-1, 2 – хромель-алюмелевая термопара, 3 – милливольтметр, 4 – блок питания, 5 – микрометрическая головка, 6 – подвес с грузом

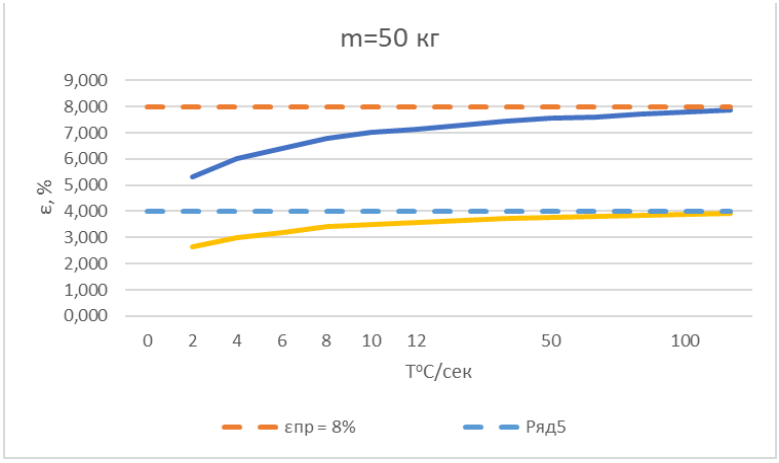


а

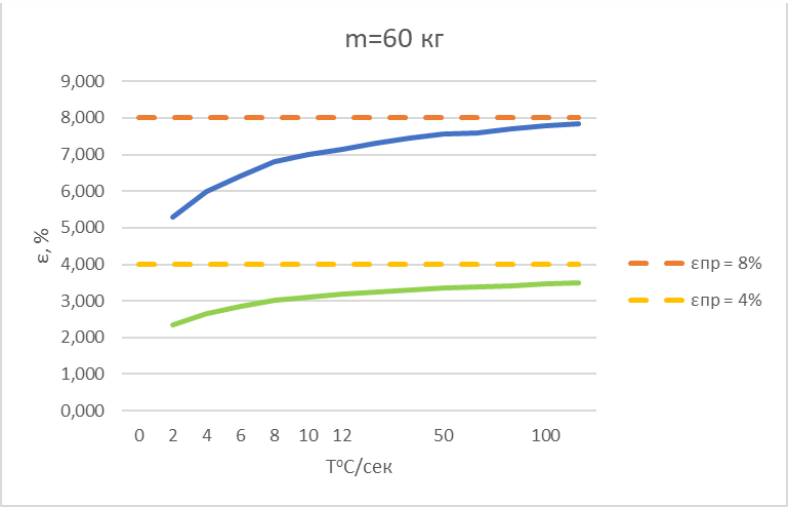
Рис. 2. Данные эксперимента (начало)



б



в



г

Рис. 2. Данные эксперимента

Таким образом, дополнительную деформацию, вызванную ползучестью при напряжениях сопротивления, близких к развиваемым МЭПФ напряжениям возврата, удается существенно уменьшить высокой скоростью нагрева, но не ликвидировать полностью.

Использование графиков, приведенных на рис. 2 позволяет прогнозировать величину степени возврата формы муфты в зависимости от скорости нагрева. Для этого необходимо для данной скорости нагрева найти отношение $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{пр}}}$ x100%. Полученное значение и есть та доля деформации, которую реализует муфта при данной скорости нагрева.

Исследование влияния скорости нагрева на развиваемые напряжения возврата. Установлено, что напряжения возврата формы с ростом температуры в образцах, находящихся под нагрузкой, растут до температуры конца обратного превращения и могут достигать 500 – 700 МПа [9,10]. При охлаждении они могут релаксировать в соответствии с кинетикой развития пластичности прямого превращения.

Однако, как показали эксперименты, явление ползучести при нагревании может привести к частичной релаксации напряжений возврата. Поскольку скоростью нагрева удается изменять величину дополнительной деформации, вызванной ползучестью, можно предположить, что существует подобная же зависимость от скорости нагрева степени релаксации напряжений возврата.

С целью определения этой зависимости была создана установка, схема которой представлена на рис. 3 . Установка имитировала процесс срабатывания муфт при обжатии соединяемых элементов.

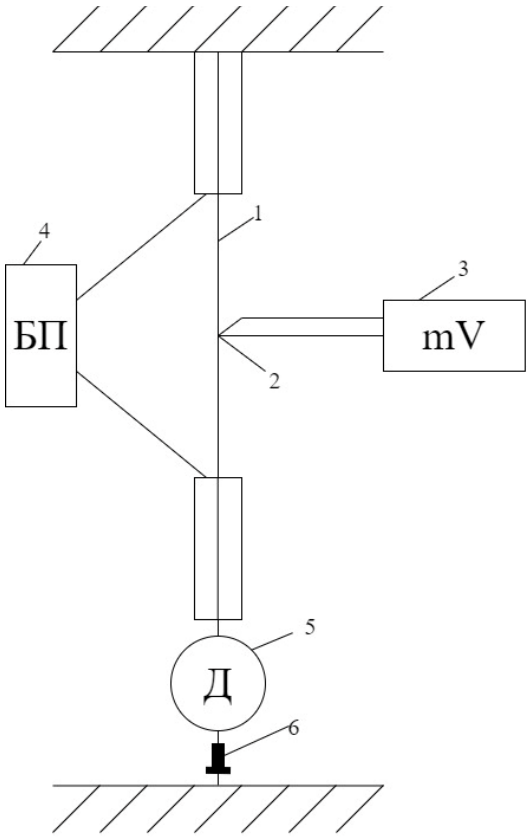


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – проволока из сплава ТН-1, 2 – хромель-алюмелевая термопара, 3 – милливольтметр, 4 – блок питания, 5 – динамометр, 6 – натяжной винт

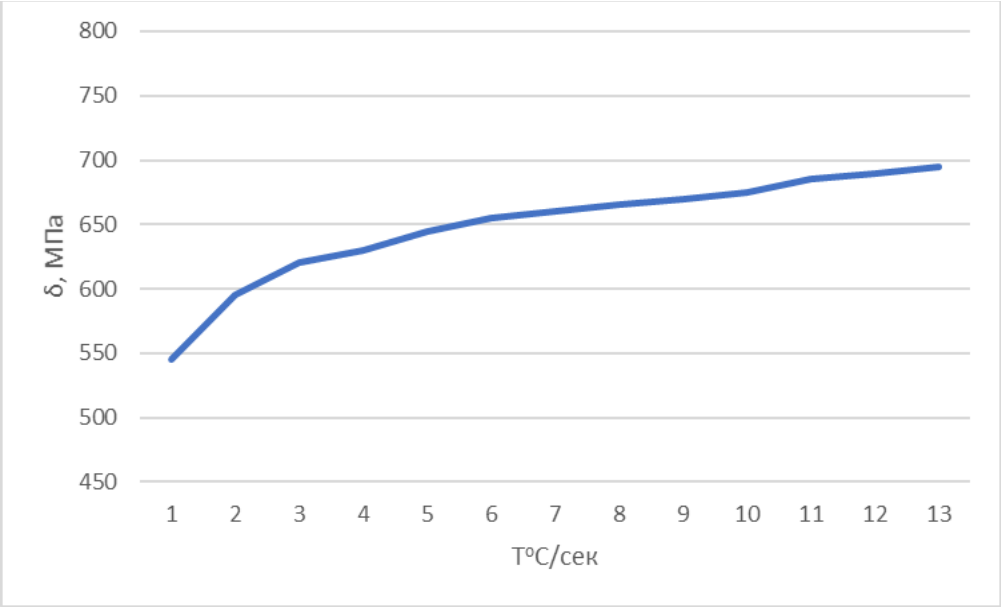


Рис. 4. Зависимость развиваемых усилий от скорости нагрева

В качестве образцов использовалась проволока 1 из сплава ТН-1 сечением 1 мм^2. Развиваемые усилия измерялись динамометром 5 марки ДПУ-0,1-2. Температура проволоки контролировалась хромель-алюмелевой термопарой 2. Нагрев проволоки осуществлялся источником тока 4 ТЭС-15. С помощью натяжного винта 6 устанавливалось растягивающее проволоку усилие, равное 100 Н. Величина растягивающего усилия выбиралась из того расчета, чтобы до начала нагрева муфта при сжатии соединения преодолевала сопротивление развальцованного бурта, который фиксирует положение муфты на соединении.

Первоначальная деформация проволоки (удлинение) задавалась равной 7,5%.

Результаты эксперимента представлены на рис. 4. Из рис. 4 видно, что развиваемые усилия увеличиваются с ростом скорости нагрева.

Так, для скоростей нагрева 1 град/сек и 6 град/сек напряжения возврата составили, соответственно, 550 МПа и 650 МПа.

Полученная зависимость $\sigma = f(T)$ может быть использована при расчете параметров муфт из ТН-I.

Толщину муфты определяют из известного выражения:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_e(R_0^2 - r_0^2)}{R_0^2 - r_0^2}$$

где: σ_e и σ_r - соответственно окружные и радиальные напряжения, развиваемые муфтой, МПа; R_0 и r_0 - соответственно наружный и внутренний радиусы муфты, мм.

Внутренний радиус муфты принимают равным радиусу соединяемых элементов.

Радиальные напряжения в муфте σ_rдолжны быть не менее предела текучести σ_T обжимаемого материала или $\sigma_{0,2}$.

Тогда, наружный радиус муфты определяется, как:

$$R_0 = \sqrt{\frac{\sigma_r + \sigma_\epsilon}{\sigma_\epsilon - \sigma_r}} r_0^2 \quad (1)$$

Подставляя в (1) значения r_0, $\sigma_r \geq \sigma_T$ (или $\sigma_{0,2}$) и σ_e, полученное по графику (рис. 4), определяют R_0.

С увеличением σ_ϵ за счет повышения скорости нагрева, R_0 уменьшается; тем самым уменьшается толщина муфты $R_0 - r_0$, а следовательно, и масса.

Рассмотрим пример: пусть соединяемые элементы имеют диаметр 40 мм и выполнены из сплава АМг6 ($\sigma_{0,2}$ = 150 МПа). Определим величину наружного радиуса муфты при скоростях нагрева I град/сек и 6 град/сек.

По графику (рис. 4) определяем σ_e при этих скоростях нагрева. Они составляют, соответственно, 550 и 650 МПа. Подставляя эти значения в (1), получим:

При Т = 1 град/сек $R_0 = 26{,}45$ мм

При Т = 6 град/сек $R_0 = 25{,}3$ мм

Таким образом, толщина муфты при Т, равной I град/сек и 6 град/сек, составит, соответственно, 6.45 мм. и 5.3 мм. При более высокой скорости нагрева масса муфты уменьшится на 18%.

Особенности нагрева муфт из МЭПФ. Одним из наиболее целесообразных способов нагрева муфт является радиационный. Лучистый поток от излучателя нагревает поверхность муфты. Внутренние слои муфты прогреваются за счет теплопроводности. Вследствие этого возникает перепад температур между наружной и внутренней поверхностью муфты.

Перепад температур может сказываться на степени возврата формы в том случае, если его величина превышает разность температур конца и начала обратного превращения. Тогда, сопротивление непрогретых внутренних слоев муфты деформации наружных слоев приводит к явлению ползучести в последних, т.е. к уменьшению общей степени возврата формы и частичной релаксации напряжений возврата.

Данный вывод подтверждается экспериментом с муфтами из сплава ТН-I, у которых разность температур превращения составляет 50°с.*) Муфты деформировались на 8%. Диаметры их измерялись микрометром. Температуры на наружной и внутренней поверхности контролировались ХА термопарами.

Результаты эксперимента, представленные на рис. 5, показали уменьшение степени возврата формы от общей ($\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{пр}}}.100\%$) с ростом перепада температур выше 50°С.

Это определяет ограничение максимальной скорости нагрева.

Она должна быть такой, чтобы разность температур по толщине муфты не превышала 50°С.

Проверка проведенных исследований на реальном соединении с муфтами, предназначенными для выполнения ТМС. Эксперименты по нагреву муфт из сплава ТН-1 для образования ТМС проводились в вакуумной камере с использованием нагревательного устройства. Скорость

нагрева варьировалась изменением напряжения питания, которое составило 34, 27 и 24 В (соответствующие значения мощностей были 578, 464 и 382 Вт). Изменение диаметра муфт в процессе их формовосстановления контролировалось двумя микрометрическими головками, а изменение температуры - ХА термопарами.

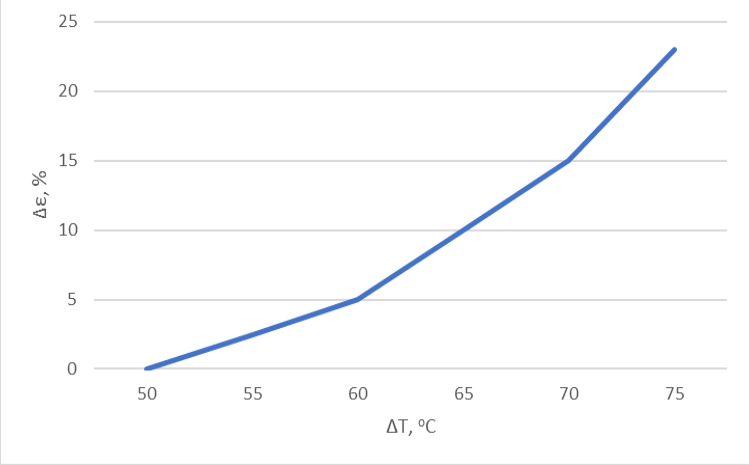


Рис. 5. Зависимость степени возврата формы от перепада температур

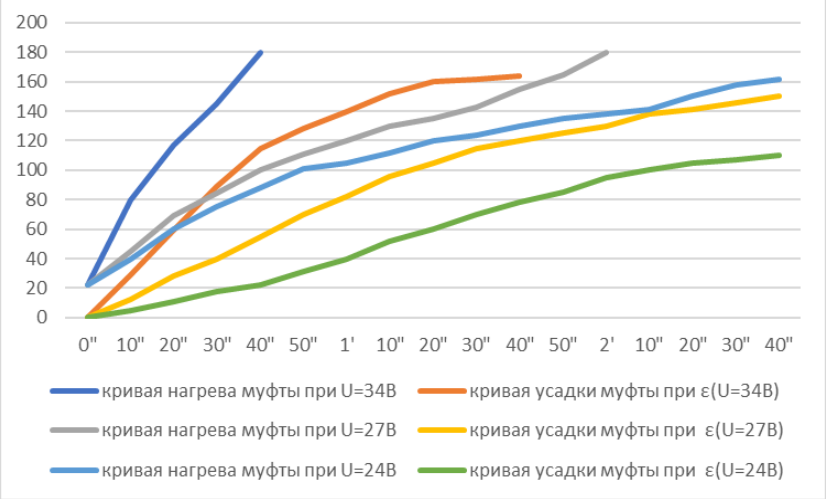


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований по нагреву муфт из сплава ТН-1 для образования ТМС

Результаты экспериментов представлены на рис. 6. Как видно из графиков, степень возврата формы увеличивается с ростом скорости нагрева. Возврат формы муфты, который происходит после прекращения нагрева, объясняется прогревом соединяемых элементов и большей податливостью к деформированию за счет генерируемых муфтой усилий.

Испытания по определению усилий разрыва соединений проводились в лаборатории сопротивления материалов НИИМ при ЛГУ.

Соединения, собранные с помощью нагревателей мощностью 464 и 382 Вт, были испытаны на прочность разрыва. Всего было испытано 14 образцов. Средние значения усилий разрыва соединений составили 43500

Н и 38800 Н, соответственно, для нагревателей мощностью 464 и 382 Вт, причем в первом случае разрушения происходили по сечению одного из соединяемых элементов, а во втором - за счет среза бурта наружнего элемента.

Таким образом, практически подтвердилась зависимость прочности соединения от степени возврата формы, а, следовательно, и от скорости нагрева. Поскольку величина зазора между соединяемыми элементами и муфтой, выполненных по 6 и 7 квалитету не превышает 50-70 мкм, можно пренебречь его влиянием на прочность соединения.

Результаты:

1. Определено влияние скорости нагрева на степень возврата формы и развиваемые усилия материала ТН-I. С ростом скорости нагрева возрастают степень возврата формы и развиваемые усилия, а следовательно, и прочность ТМС.

2. Установлено, что увеличение скорости нагрева приводит к уменьшению геометрических размеров муфты и ее массы при обеспечении равнопрочного соединения. Ограничением для скорости нагрева является максимально допустимый перепад температур по толщине муфты (для сплава ТН-1 - 50°С), связанный с недопустимостью возникновения ползучести в наружных слоях муфты относительно внутренних.

Список литературы

1. Гришанина Т.В. Численно-аналитический метод расчета колебаний регулярных конструкций / Т. В. Гришанина, Ф. Н. Шклярчук // Механика композиционных материалов и конструкций. 2022. Т. 28, № 2. С. 175-186. EDN QGYKOA.

2. Моделирование температурного режима привода из материала с эффектом памяти формы / В. Н. Зимин, Г. Н. Кувыркин, И. Ю. Савельева, А. О. Шахвердов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19, № 4. С. 7-15. DOI 10.36622/VSTU.2023.19.4.001. EDN TQWURI.

3. Расчет раскрытия трансформируемой космической конструкции с приводом из материала с эффектом памяти формы / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, Г. Н. Кувыркин, А. О. Шахведов // Материалы XXIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2023): Материалы конференции, с. Дивноморское, Краснодарский край. Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2023. С. 576-578. EDN DIXOJA.

4. Шалыгина Т.А. Интеллектуальные композиционные материалы с эффектом памяти формы на основе полиуретана и модифицированного карбида кремния : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шалыгина Таисия Александровна, 2023. 126 с. EDN VVVKIR.

5. Москалева Ю.А. Применение материалов с эффектом памяти формы / Ю. А. Москалева, В. В. Корчагин // II научно-педагогические чтения молодых ученых имени профессора С. В. Познышева : сборник материалов межведомственной научно-практической конференции курсантов и студентов. Воронеж: Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний России, 2022. С. 79-83. EDN EJBHVI.

6. Привод из материала с эффектом памяти формы для раскрытия трансформируемой космической конструкции / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, Г. Н. Кувыркин, А. О. Шахвердов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 4(348). С. 97-102. DOI 10.33979/2073-7408-2021-348-4-97-102. EDN XYDEXI.

7. Кувыркин Г.Н. Тепловой режим привода из материала с эффектом памяти формы / Г. Н. Кувыркин, И. Ю. Савельева, А. О. Шахвердов // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену : Материалы конференции. Том 2. Москва: Национальный исследовательский университет "МЭИ", 2022. С. 225-227. EDN OLUOUC.

8. Уханов И.Г. Исследование динамики упругих элементов конструкции космических аппаратов с системой раскрытия и зачековки на основе материала с эффектом памяти формы / И.Г. Уханов, Г. А. Матвеев, Я. А. Галкин // Авиакосмическое приборостроение. 2024. № 10. С. 28-35. DOI 10.25791/aviakosmos.10.2024.1436. EDN GFPTPQ.

9. Современные материалы с памятью формы / Е. В. Петроченко, О. С. Молочкова, И. А. Деева, А. Л. Соколова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2023. Т. 14, № 1. С. 16-18. EDN ASBQUD.

10. Привод из материала с эффектом памяти формы для трансформируемых космических конструкций / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, В. С. Филиппов, А. О. Шахвердов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 1. С. 73-80. DOI 10.31772/2712-8970-2022-23-1-73-80. EDN OUCZJI.

Донюков Игорь Александрович, канд. техн. наук, доцент, mai@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Поцебнева Ирина Валерьевна, канд. тех. наук, доцент, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

DETERMINATION OF OPTIMAL HEATING MODES FOR MEMF COUPLINGS

I.A. Donyukov, I.V. Pocebneva

The paper examines the features of using couplings made of shape memory material (SMEM) for the installation of truss structures deployed in Earth orbit. Particular attention is paid to the study of the effect of heating rate on the degree of shape return of couplings. As a result of the study, it was found that with an increase in the heating rate, the degree of shape return and the developed forces increase, and, consequently, the strength of the thermomechanical connection (TMC). All theoretical results obtained in the work are confirmed by experimental studies.

Key words: degree of shape return, heating rate, return voltage, joint breaking force.

Donyukov Igor Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, mai@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Pocebneva Irina Valerievna, candidate of technical sciences, docent, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)

УДК 621.9.048.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-605-606

МОДЕЛЬ УДАРА СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА ПО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

А.В. Королев, А.С. Бондарева, А.А. Королев

Статья посвящена моделированию процесса формирования пластической области контакта индентора с обрабатываемой поверхностью в процессе ультразвуковой обработки. Показано, что при ударе индентора по обрабатываемой поверхности возникает упругая и пластическая зоны деформации. Определены размеры области контакта и размеры пластического пятна контакта. Предложена зависимость для определения энергии пластической деформации, затраченной при ударе индентора по обрабатываемой поверхности. Предложенные зависимости могут использоваться при исследовании процесса формирования микрорельефа при ультразвуковом выглаживании.

Ключевые слова: удар, пластическая деформация, ультразвуковая обработка, алмазное выглаживание, энергия деформации.

Введение. Ультразвуковая обработка нашла широкое применение в промышленности. Она используется при обеспечении коррозионной стойкости поверхности [1,10], для измельчения на поверхности зерен металлов [2], для улучшения трибологических свойств поверхности [3, 12], для нанесения на поверхности различных пленок [4], создание на поверхности деталей сжимающих напряжений и упрочнения поверхностного слоя [5, 6, 8, 11], для повышения усталостной прочности поверхности деталей [7, 9, 10, 13, 15], для ультразвуковой сварки листов металла [14], в аддитивном производстве [16] и во многих других случаях. Для осуществления всех этих процессов ультразвуковой обработки затрачивается энергия пластической деформации. Пластическая деформация сопровождается упругой деформацией. Но упругая деформация не производит полезную работу, так как после осуществления контакта индентора с обрабатываемой поверхностью эта энергия возвращается в систему. Поэтому для эффективного управления процессом ультразвуковой обработки важно определить и оптимально использовать энергию пластической деформации.

Математическому моделированию процесса ультразвуковой обработки посвящено большое количество работ. Но большинство из них носят

экспериментальный характер [17-20] и поэтому могут использоваться только в строго определенных условиях эксперимента. Часто для моделирования процесса ультразвуковой обработки используется метод конечных элементов [21,22]. Но этот метод может применяться в ограниченных условиях осуществления процесса и не выявляет новые общие закономерности исследуемого процесса. Большинство теоретических исследований [23-26] не учитывает влияние на результаты обработки энергии пластической деформации заготовки, что может привести к недостаточной точности предложенных моделей. Поэтому является актуальным моделирование затрат энергии пластической деформации при ультразвуковой обработке металлов.

Методика эксперимента. Для определения энергии пластической деформации в процессе ультразвуковой обработки металлов рассмотрим самую общую схему взаимодействия алмазного наконечника с обрабатываемой поверхностью, изображенную на рисунке 1.

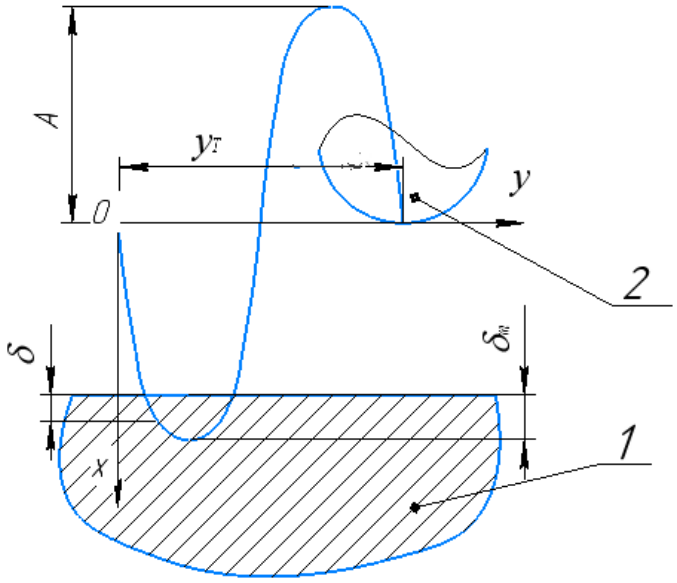


Рис. 1. Схема взаимодействия индентора и заготовки

Индентор 2 совершает вынужденные гармонические колебания с амплитудой А и периодически осуществляет удар по поверхности заготовки 1. Введем декартовую систему координат: ось Oy совместим с осью колебаний индентора, ось Ox направим в сторону поверхности заготовки, за начало координат примем начало такта колебания индентора. При взаимодействии с заготовкой 1 индентор внедряется в ее поверхность на максимальную величину δ_m. За время одного такта колебания индентора 2 заготовка переместится вдоль оси Oy на величину y_T.

Математическая модель пластического удара. Наиболее полно колебания индентора описываются линейным дифференциальным уравнением второго порядка (1):

$$\frac{dx^2}{dt^2}m + k\frac{dx}{dy} + \omega^2 mx = F_s(t), \qquad (1)$$

где k – коэффицент диссипации, кг/с; $F_s(t)$ – вынуждающая сила в момент времени t, приводящая индентор в движение, H m – колеблющаяся масса индентора, кг.

Равенство (1) отвечает условию кинетостатического равновесия инерционной составляющей (первое слагаемое), диссипативной составляющей (второе слагаемое), восстанавливающей составляющей (третье слагаемое) и вынуждающей (F_s) сил.

Диссипативная сила появляется в момент удара индентора об обрабатываемую поверхность, так как часть энергии удара расходуется на пластическую деформацию и выделение тепла. Для определения степени пластической деформации металла при неупругом ударе воспользуемся методикой, изложенной в работе [27]. В этой работе показано, что при упруго пластической деформации сферы и плоскости в центре контакта будет осуществляться пластическая деформация, а по ее краям - упругая деформация. На рисунке 2 сплошной линией показана фактическая эпюра.

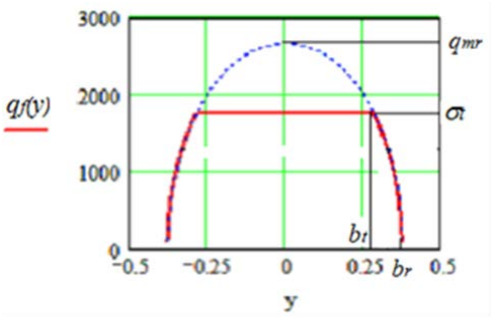


Рис. 2. Эпюра контактных напряжений при упругопластическом контакте тел

Как видно из рисунка 2, в середине площадки контакта образуется круговая площадка радиусом b_r с контактными напряжениями, равными пределу пластичности материала σ_t, а на остальной части площадки контакта, имеющей радиус b, возникают упругие напряжения, величина которых распределяется по закону полуэллипсоида и снижается в направлении к периферии площадки контакта.

На основе рисунка 2 можно найти силу взаимодействия сферы и плоскости при упругопластическом контакте по формуле 2:

$$dF = 2\pi q \cdot ydy \quad \text{при } b_t < y \le b;$$
$$dF = 2\pi\sigma_t \cdot ydy \text{ при } 0 \le y \le b_t, \qquad (2)$$

где b - радиус площадки контакта, мм; b_t – радиус той части площадки контакта, на которой действует пластическая деформация, мм; q – значение контактных напряжений, возникающих на площадке контакта, если бы контакт был чисто упругим, МПа; σ_t – контактные напряжения, при которых возникает пластическое течение материала, МПа.

В соответствии с теорией Герца для круговой площадки контакта контактное напряжение на окружности площадки контакта радиусом y равно (3):

$$q(y) = q_m \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}\ , \tag{3}$$

где q_m – значение максимальных контактных напряжений (4), возникающих в центре площадки контакта, если бы контакт был чисто упругим, МПа, равное:

$$q_m = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\frac{3F_{us}}{\eta^2 r^2}}, \tag{4}$$

$$\eta = \frac{1 - m_1^2}{E_1} + \frac{1 - m_1^2}{E_1}, \tag{5}$$

где η – коэффициент упругих свойств материала контактирующих тел, $1/\text{МПа}$; m_z и m_r – коэффициенты Пуассона соответственно материалов заготовки и индентора; E_z и E_r- модули упругости материалов заготовки и индентора соответственно, МПа; F_{us} – условная сила упругого взаимодействия контактирующих поверхностей при чисто упругом контакте, Н.

Так как в соответствии с теорией Герца общий размер площадки контакта b, м определяется по формуле 6:

$$b = 0{,}91\sqrt[3]{F_{us} \cdot \eta \cdot r}, \tag{6}$$

то с учетом (6) равенство (4) примет вид:

$$q_m = \frac{b}{0{,}91 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}, \tag{7}$$

Интегрируя равенства (2) и раскрывая значения q(y): (3)-(5), найдем силу взаимодействия между контактирующими телами F (8):

$$F = 2\pi q_m \int_{b_t}^{b} y\sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}\,dy + 2\pi\sigma_t \int_0^{b_t} y dy\,, \tag{8}$$

Решая интегральные выражения (8), получим:

$$F = \frac{2}{3}\pi q_m b^2 \sqrt{\left(1 - \frac{b_t^2}{b^2}\right)^3} + \pi\sigma_t b_t^2, \tag{9}$$

Первое слагаемое равенства (9) представляет собой силу упругой деформации материалов контактирующих тел в зоне контакта Fu, а второе слагаемое – силу пластической деформации Fu.

Из равенства (3) следует, что

$$q_m = \frac{\sigma_t}{\sqrt{1 - \frac{b_t^2}{b^2}}} \quad \text{при } b_t \geq 0, \tag{10}$$

С учетом (10) равенство (9) примет вид:

$$F = \pi\sigma_t b_t^2 \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{b^2}{b_t^2\sqrt{1 - \frac{b_t^2}{b^2}}} + 1\right) \text{при } b_t \geq 0, \tag{11}$$

В равенстве (11) являются неизвестными величины b и b_t. Для их определения из равенств (7) и (9) определим:

$$b = 0{,}91 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \frac{\sigma_t}{\sqrt{1 - \frac{b_t^2}{b^2}}} \quad \text{при } b_t \geq 0 \tag{12}$$

Из равенства (12)

$$b = \sqrt{b_t^2 + (0{,}91 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot \sigma_t)^2} \tag{13}$$

Подставив равенство (13) в выражение (11), определим величину b_t:

$$F = \pi \sigma_t b_t^2 \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{b_t \left(1 + \left(\frac{0{,}91 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot \sigma_t}{b_t}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}{0{,}91 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot \sigma_t} + 1 \right) \tag{14}$$

После преобразования получим:

$$F = \pi \sigma_t \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{(b_t^2 + (0{,}91 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot \sigma_t)^2)^{\frac{3}{2}}}{0{,}91 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot \sigma_t} + b_t^2 \right) \tag{15}$$

Как видно из выражения (15), величина b_t в элементарных функциях не выражается. Ее значения следует определять численными методами.

Энергия удара поглощается на пластической части площадки контакта индентора с обрабатываемой поверхностью, что производит изменение геометрических и физико-механических ее параметров. Энергия удара на упругой части поверхности контакта после удара изменения на обрабатываемой поверхности не производит. Поэтому важно определить долю силы удара, приходящуюся на пластическую часть поверхности контакта.

Долю силы удара, приходящуюся на пластическую деформацию, определим из равенства (11):

$$F_t = F \cdot \frac{\frac{3b_t^2}{2b^2}\sqrt{1 - \frac{b_t^2}{b^2}}}{\left(1 + \frac{3b_t^2}{2b^2}\sqrt{1 - \frac{b_t^2}{b^2}}\right)} \text{ при } b_t \geq 0 \tag{16}$$

Как видно из выражения (16), доля силы *Ft*, вызывающей пластическую деформацию обрабатываемой заготовки, в общей силе удара F зависит исключительно от соотношения размеров общей b и пластической b_t площадок контакта.

Найдем перемещение тел в центре упругопластического контакта. Площадка нагружена равномерным давлением σ_t. Тогда перемещение материала заготовки в центре пятна контакта равно [28]:

$$\delta = \frac{2(1 - m_z)}{E_z} \sigma_t \cdot b_t, \tag{17}$$

где δ – деформация контактирующих поверхностей, м.

Элементарная составляющая энергии взаимодействия твердых тел:

$$dU = F(\delta) d\delta \tag{18}$$

На основе равенства (17) определим:

$$d\delta = \frac{2(1-m_z)}{E_z}\sigma_t \cdot db_{ts} \quad (19)$$

где b_{ts} – текущее значение размера пластического пятна контакта, м.

Произведя замену переменной и интегрируя равенство (18), с учетом того, что:

$$F_t(b_{ts}) = \pi \cdot \sigma_t \cdot b_{ts}^2$$

определим энергию пластической деформации обрабатываемой поверхности:

$$U = \pi\frac{2(1-m_z)}{E_z}{\sigma_t}^2\int_0^{b_t}{b_{ts}}^2\,db_{ts} \quad (20)$$

После интегрирования равенства (20) получим:

$$U = \pi\frac{2(1-m_z)}{3E_z}{\sigma_t}^2 \cdot {b_t}^3 \quad (21)$$

Как видно из равенства (21), энергия пластической деформации обрабатываемой поверхности в наиболее значительной степени зависит от размера пластического пятна контакта индентора с обрабатываемой поверхностью. В свою очередь, размер пластического пятна контакта очень сложно зависит от механических свойств обрабатываемой поверхности и индентора и определяется из равенств (15) и (16) в зависимости от силы удара индентора по обрабатываемой поверхности.

Заключение. Исследования показали, что при ударе сферического индентора об обрабатываемую поверхность образуется площадка контакта, состоящая из двух частей: в центре, возникает площадка пластического контакта, вызванная пластической деформацией обрабатываемой поверхности, а по краю общей площадки контакт возникает кольцевая площадка упругого контакта. Размер общей площадки контакта и размер пластического контакта неявно зависят от множества факторов: силы удара, упругих и пластических свойств материала обрабатываемой поверхности, от упругих свойств индентора и его радиуса. Доля силы пластического удара в общей силе удара зависит исключительно от соотношения размеров общей площадки контакта и площадки пластической деформации. На энергию пластической деформации самое большое влияние оказывает размер пластического пятна контакта, в меньшей степени - предел текучести материала обрабатываемой поверхности и ее упругие свойства.

Результаты исследования могут использоваться при моделировании различных процессов, протекающих при ультразвуковой обработке: процесса формирования микрорельефа поверхности, ее структуры, трибологических свойств, износостойкости, прочностных свойств, коррозионной стойкости, процесса образования на поверхности различных пленок, процесса ультразвуковой сварки и других, так как все эти процессы протекают при затрате энергии пластической деформации, возникающей при ударе индентора об обрабатываемую поверхность.

Список литературы

1. Research on the corrosion resistance and the passive film growth of ni-based superalloy surface treated by ultrasonic impact / H. Jiang, J. Guan, Ya. Zhao, Ya. Yang, J. Qu // Anti-Corrosion Methods and Materials. 2024. Vol. 71. № 1. P. 65-73. DOI: 10.1108/ACMM-09-2023-2899.

2. Surface grain refinement of casting a380 aluminum alloy by ultrasonic-assisted surface mechanical grinding treatment / Yu. Li, Y. Wang, J. Chen, Y. Chae Lim, Zh. Feng // Materials Letters. 2024. Vol. 354. P. 135-387. DOI: 10.1016/j.matlet.2023.135387.

3. Optimizing tribological property by inducing the gradient microstructure and surface topography in martensite stainless steel / Ch. Yuan, X. Yan, D. Liu, J. Yang, Sh. Li // Materials Today Communications. 2024. Vol. 38. P. 107-699. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107699.

4. Аэрографическое нанесение композитных стоматологических материалов: эффективное устранение деструкции эмали зуба и улучшение эстетических качеств лечения дисколоритов / В.А. Захаров, В.В. Ростовцев, В.П. Чуев В.Ф. Посохова // Прикладные информационные аспекты медицины. Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко. 2024. Т. 27, №1. С. 37-42.

5. Simulation of residual stress of v-notch specimen treated by ultrasonic rolling / Zh. Liu, Zh. Niu, H. Liu, K. Xu, Sh. Qin // Journal of Materials Engineering and Performance. 2024. DOI: 10.1007/s11665-023-09086-8.

6. Mishra A., Ojha A. Nanostructuring of ferritic steel: a review on enhanced surface properties using ultrasonic shot peening // Prabha Materials Science Letters. 2024. Vol. 3. №1. P. 107-699. DOI: 10.33889/PMLS.2024.3.1.002.

7. Influence of surface integrity on the fatigue performance of tib2/al composite treated by ultrasonic deep rolling: experiments and simulations / Yu. Li, J. Geng, Zh. Wang, C. Song, Ch. Zhang, D. Chen, H. // Wang Composites Part B: Engineering. 2024. Vol. 271. P. 111-160. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.111160.

8. Gradient hardening of ni-based superalloy k403 for enhanced thermal fatigue resistance / G. Tang, Sh. Li, J. Yang, X. Zhou, R. She, D. Li, T. Zou, J. Wang, Zh. Liang // Surface and Coatings Technology. 2024. Vol. 478. P. 130-434. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.130434.

9. Effect of ultrasonic impact treatment on the microstructure and properties of laser cladded cocrfenimox high entropy alloy coatings / M. Li, L. Guo, J. Li, Qi. Zhang, B. Han, L. Song // Surface and Coatings Technology. 2024. Vol. 476. P. 130-243. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130243.

10. Influence of ultrasonic shot peening on the microstructure and corrosion behavior of az80m magnesium alloy / M. Han, Ju. Du, Yu. Chen, Q. Sun, K. Hu // Journal of Alloys and Compounds. 2024. Vol. 980. P. 173-633. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.173633.

11. Microstructure evolution and numerical modeling of tc4 titanium alloy during ultrasonic shot peening process Yu. Yi, F. Yin, J. Zhai, Ya. Liu //

Metals. 2024. Vol. 14. № 3. P. 275. DOI: 10.3390/met14030275.

12. Effect of ultrasonic surface rolling on the friction and wear properties of 8620h carburized steel at elevated temperatures / H. Zhong, Sh. Qu, W. Long, R. Deng, W. Zhou // Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 2720. № 1. P. 012-029. DOI: 10.1088/1742-6596/2720/1/012029.

13. The effects of stress ultrasonic rolling on the surface integrity and fatigue properties of tib2/7050 al composite / J. Wu, Zh. Zuo, J. Geng, Zh. Wang, J. Dang, Yu. Li, Ch. Zhang, D. Chen, M. Chen, H. Wang // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 118. P. 315-330. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.03.017.

14. Influence of surface condition of copper sheets on ultrasonic metal welding / E. Helfers, F.W. Müller, A. Schiebahn, U. Reisgen // Journal of Advanced Joining Processes. 2024. Vol. 9. P. 100-204. DOI: 10.1016/j.jajp.2024.100204.

15. Jia Zh., Wang Zh.Zh., Fu Li. Effect of high-intensity ultrasonic treatment on refinement of al-5cu alloy ingots // Materiali in Tehnologije. 2024. Vol. 58. №2. P. 185-192. DOI: 10.17222/mit.2023.1038.

16. Application of ultrasonic surface treatment technologies in metals and alloys additive manufacturing / S.M. Voloshko, A.P. Burmak, A.K. Orlov, M.M. Voron // Металознавство та обробка металів. 2024. Vol. 30. №1. P. 28-39.

17. Сидоров О.В. Лабораторная установка для исследования ультразвуковых колебаний при обработке конструкционных материалов ультразвуком: теоретические основы метода, технология моделирования и конструирования комплектующих изделий установки, применение установки в лабораторном практикуме: учеб. пособие. Ишим: Изд-во ИПИ им. П.П. Ершова (филиала) ТюмГУ, 2022. 93 с.

18. Минин А.О., Трушников В.Е., Романов П.И. Влияние направления ультразвуковых колебаний на процесс токарной обработки // Металлообработка. 2022. № 2 (128). С. 16-22.

19. Балтаев Т.А., Омаров А.Н., Нургалиев Л.М. Рациональные условия ультразвуковой стабилизации остаточных напряжений в круглых пластинах // Технический сервис машин. 2022. № 3 (148). С. 106-113.

20. Хазов А.В., Унянин А.Н. Повышение режущей способности шлифовального круга при обработке заготовок из пластичных сталей наложением ультразвуковых колебаний на заготовку // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1 (55). С. 55-62.

21. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния очага деформации заготовки из умз ti grade 4, подвергнутой безабразивной ультразвуковой финишной обработке / Р.Н. Асфандияров, Г.И. Рааб, Д.В. Гундеров., Д.А. Аксенов, А.Г. Рааб // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2022. Т. 28, № 5. С. 36-45.

22. Савельев К.С., Илюшкин М.В., Киселев Е.С. Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых заготовок // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1 (55). С. 42-54.

23. Киселев Е.С., Малышев В.И., Ковальногов В.Н. Новые ультразвуковые технологии изготовления деталей машин: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств"; "Автоматизированные технологии и производства". Тольятти: Тольяттинский гос. ун-т, 2014. 327 с.

24. Сарсенгалиев А.М. Повышение эффективности ультразвукового удаления оксидного поверхностного слоя с внутренних поверхностей в деталях сложной конструкции сочетанием кавитации и контактного вибровоздействия: дис. … канд. техн. наук: 05.02.07. Саратов, 2018. 131 л.

25. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Вяликов И.Л. Исследование и разработка нового высокоэффективного метода виброабразивной ультразвуковой обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. №7(127). С. 38-44.

26. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Вяликов И.Л. Теоретические основы повышения эффективности виброабразивной обработки при наложении ультразвукового поля // Вестник машиностроения. 2015. № 7. С. 38-41.

27. Мищенко К.С. К вопросу поверхностной пластической деформации дорожек качения шариковых подшипников // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 5 (161). С. 202-204.

28. Пинегин С.В. Контактная прочность и сопротивление качению. М.: Машиностроение. 1969. – 269 с.

Королев Альберт Викторович, д-р. техн. наук, профессор, science7@bk.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Бондарева Альбина Серкалиевна, аспирант, topeneva97@mail.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Королев Андрей Альбертович, д-р. техн. наук, профессор, kor_science@mail.ru, Россия, Саратов, Саратовская государственная юридическая академия

MODEL OF IMPACT OF A SPHERICAL INDENTOR ON A PROCESSED SURFACE DURING ULTRASONIC PROCESSING

A.V. Korolev, A.S. Bondareva, A.A. Korolev

The article is devoted to modeling the process of forming a plastic area of contact between an indenter and a workpiece during ultrasonic processing. It is shown that when an indenter hits a workpiece, elastic and plastic deformation zones arise. The dimensions of the contact area and the dimensions of the plastic contact spot are determined. A dependence is proposed for determining the energy of plastic deformation spent when the indenter hits the workpiece. The proposed dependences can be used to study the process of microrelief formation during ultrasonic smoothing.

Key words: impact, plastic deformation, ultrasonic processing, diamond smoothing, deformation energy.

Korolev Albert Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, science7@bk.ru, Russia, Saratov, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin,

Bondareva Albina Serkalievna, postgraduate, topeneva97@mail.ru, Russia, Saratov, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin,

Korolev Andrey Albertovich, doctor of technical sciences, professor, kor_science@mail.ru, Russia, Saratov, Saratov State Law Academy

УДК 629.488.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-614-615

МАНЕВРОВОЕ УСТРОЙСТВО ВАГОНОВ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ НА ПУТЯХ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

А.В. Клюканов

В работе выделена взаимосвязь технологического оборота вагонов от качества использования маневровых операций. Предложено на путях необщего пользования промышленных предприятий, а также для перемещения вагонов во время погрузочно-разгрузочных работ на участках прирельсовых складов использовать маневровое устройство со способностью осуществлять торможения перемещаемых вагонов. Рассмотрены конструктивные особенности маневрового устройства и произведен подбор компрессора. Выполнена оценка эффективности применения маневрового устройства грузовых вагонов на основе экспертного анализа с учетом предложенного синтетического коэффициента. Даны рекомендации по последующей модернизации маневрового устройства.

Ключевые слова: маневровая работа, оборот вагонов, маневровое устройство, самоходная платформа, вилочный погрузчик, система управления тормозами вагонов, компрессор, вал отбора мощности.

Вагонооборот – это общий комплексный показатель качества работы железнодорожного транспорта, который отражает результаты технической, экономической и организационной деятельности всех участков железнодорожной сети. В нем также оценивается качество инфраструктуры железнодорожного транспорта и использование парка вагонов.

Оборот вагона представляет собой время, затрачиваемое вагоном на выполнение одного цикла работы, включающего все операции, связанные с перевозочным процессом. Оборот вагона с разложением по элементам за 6 месяцев 2023 и 6 месяц 2024 гг. представлен на рис.1 [1].

Оборот грузового вагона рабочего парка по итогам 6 месяцев 2024 г. составил 20,1 суток (481,8 часа), что на 10,2% (или на 44,6 часа или на 1,9 суток) больше, чем показатель аналогичного периода предыдущего года (18,2 сут. или 437,2 ч.). Разложение оборота вагона по элементам позволяет заметить, что из общего ухудшения величины оборота вагона,

наибольшее (27,9 ч. из 44,6 ч. или 52,5% всей величины ухудшения) приходится на показатель нахождения под грузовыми операциями. В процентах его рост составил + 14,0% (со 198,9 ч. в первом полугодии 2023 г. до 226,8 часа за первое полугодие 2024 г.). Доля этого элемента в структуре оборота вагона выросла на 1,6 процента.

Другим элементом, влияющим на увеличение оборота вагона стало нахождение на технических станциях. Данный показатель вырос со 151,5 часа в первом полугодии 2023 г. до 166,0 часа в первом полугодии 2024 г. или на 14,5 часов (+9,6%).

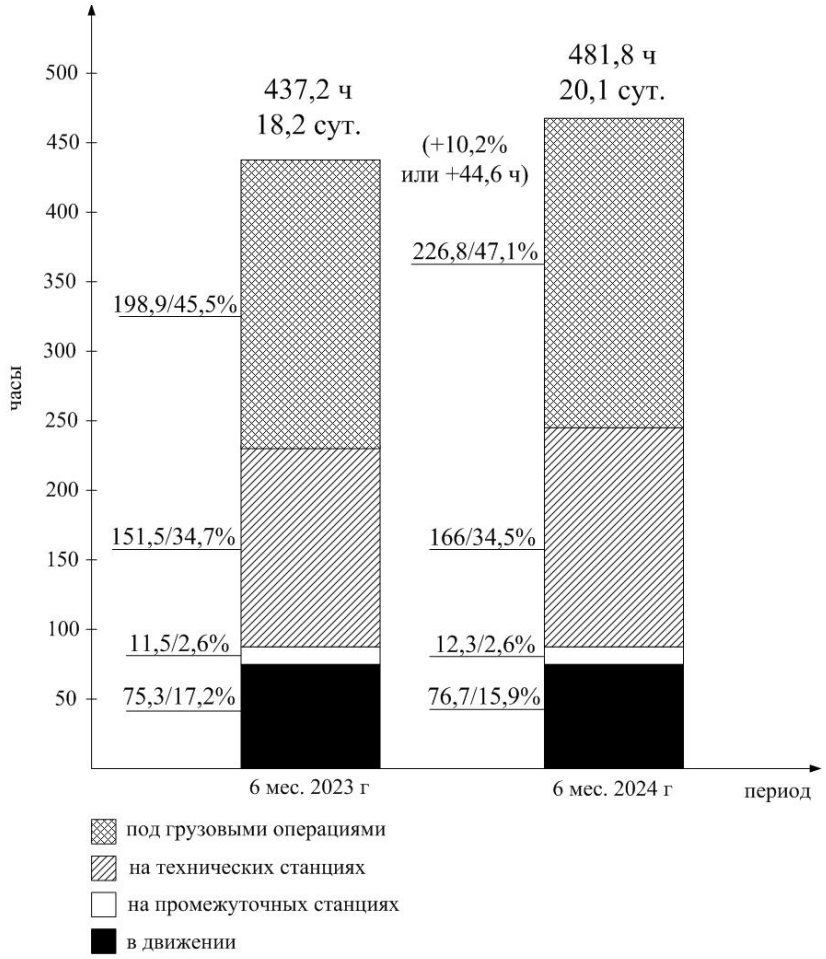


Рис.1– Оборот вагона с разложением по элементам за период 6 месяцев 2023 г. и 6 месяцев 2024 г

Вместе с тем доля этого элемента в структуре оборота вагона несколько снизилась (с 34,7% до 34,5%, т.е. на 0,2 процента). Следует отметить, что, несмотря на то, что абсолютное значение времени нахождения в движении выросло, тем не менее, доля элемента нахождения в движении снизилась с 17,2% до 15,9 % (т.е. снижение на 1,3 %). Это означает, что в целом в структуре оборота вагона на сети ОАО выросла доля «РЖД» различных простоев. Если в первом полугодии 2023 г. вагон находился в простоях 82,8% от всего времени оборота вагона, то в первом полугодии 2024 г. он находится в простоях 84,1% времени оборота [1,2].

Применительно к показателю оборота вагона, увеличение показателя означает его ухудшение [1,2].Оборот грузового вагона важен не только для оценки производственных показателей парка, но и напрямую влияет на рентабельность перевозок. Тариф на вагон формируется исходя из стандартного оборота вагона. Увеличение периода оборота приводит к снижению рентабельности на вагон, поскольку клиент платит за стандартное количество дней перевозки, но фактически вагон используется дольше.

Одним из резервов ускорения оборота грузовых вагонов на станциях и путях примыкания путей необщего пользования является сокращение времени на маневровые операции с применение современных маневровых устройств [3,4].

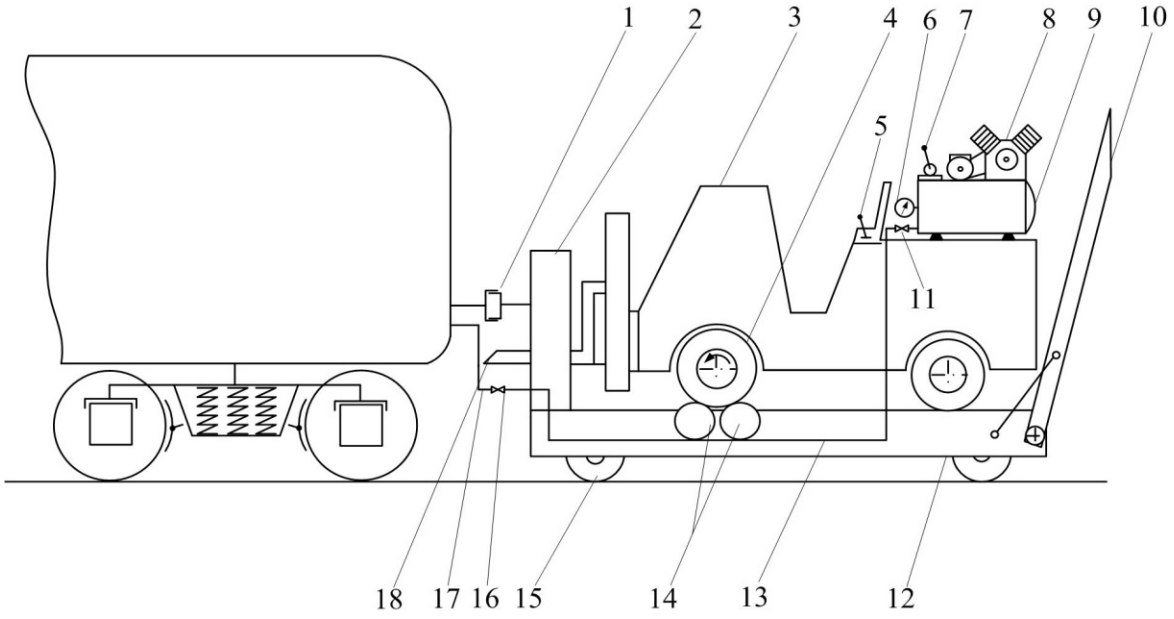
Техническая проблема заключается в разработке автономного маневрового устройства, направленная на повышение эффективности системы управления тормозами перемещаемых вагонов и стопорения приводных колёс самоходной тележки при заезде на неё вилочного погрузчика.

Для достижения технического результата предложено маневровое устройство с системой управления тормозами, которое приведено на рис. 2а-2в. На рис.2а – представлено изображение заявленного устройства, общи вид. На рис 2б – представлено изображение заявленного устройства, вид на кинематическую схему привода самоходной платформы с червячным редуктором. На рис. 2в– представлено изображение заявленного устройства, вид на вал отбора мощности компрессора с приводом от вилочного погрузчика [4,5].

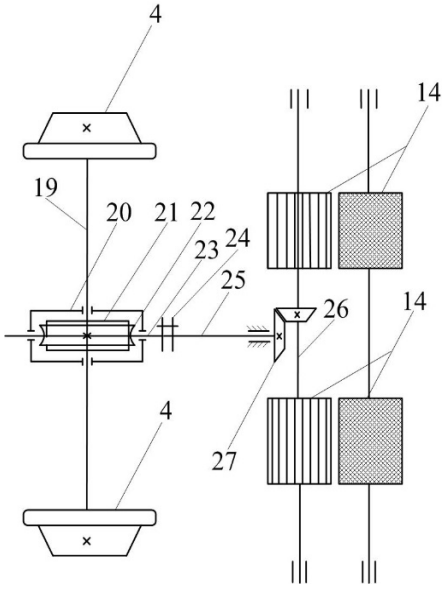
Позиции на рисунках обозначают: 1 – автосцепное устройство, 2 – прижимное устройство, 3 – вилочный погрузчик, 4 – передние колеса вилочного погрузчика, 5 – рычаг управления кареткой, 6 – манометр, 7 – кран управления пневматической системы, 8 – компрессор, 9 – главный воздушный резервуар,10 – откидные трапы, 11 – отсечной кран на пневматическом рукаве, 12 – самоходная платформа, 13 – гибкий междувагонный соединительный пневматический рукав, 14 – приводные катки, 15– приводные колёса самоходной платформы, 16 – головка для соединения с тормозной магистралью вагона, 17 – тормозная магистраль вагона, 18 – вилы, 19– ось приводных колёс самоходной платформы, 20 – червячный редуктор, 21 – червячное колесо, 22 – червяк, 23 – входной вал,24 – муфта сцепления, 25 – вал конического редуктора, 26 – ось приводных катков, 27 – конический редуктор, 28 – двигатель погрузчика, 29 – коробка переключения передач, 30 – ведущая шестерня КПП, 31– ось, 32 – корпус вала отбора мощности, 33 – подвижная шестерня, 34 –каретка, 35– ведущий шкив, 36 – клиновые ремни, 37– ведомый шкив, 38 – вал компрессора, 39 – паз, 40 – вторичный вал, 41 – шлицы, 42 – промежуточная шестерня ВОМ [5].

Маневровое устройство для вагонов состоит из самоходной платформы 12, с одной стороны оснащенной откидными трапами 10, а с другой прижимным устройством 2 с автосцепкой 1 и вилами 18 которые входят в зацепление с прижимным устройством 2.

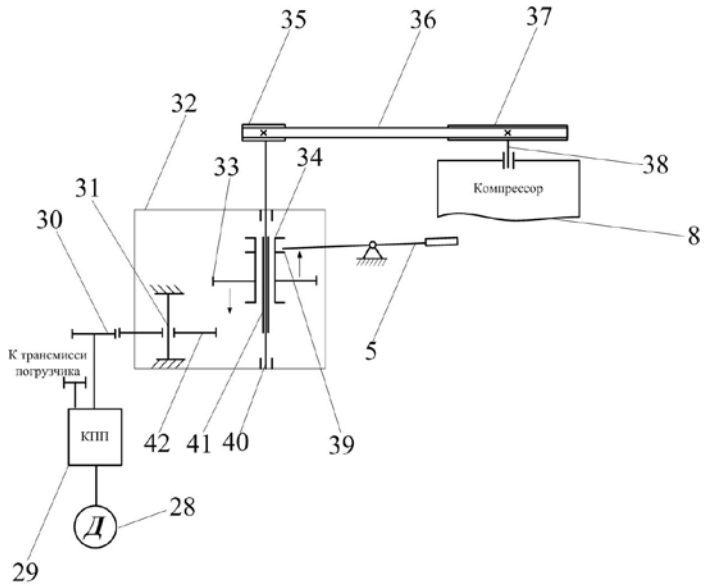
Маневровое устройство для вагонов состоит из самоходной платформы 12, с одной стороны оснащенной откидными трапами 10, а с другой прижимным устройством 2 с автосцепкой 1 и вилами 18 которые входят в зацепление с прижимным устройством 2. На самоходной платформе 12 установлен погрузчик 3, передние колёса 4 которого размещены на двух парах приводных катков 14.



а



б



в

Рис. 2. Маневровое устройство с системой управления тормозами: а - общий вид; б - кинематическая схема привода с червячным редуктором; в - вид на вал отбора мощности компрессора от вилочного погрузчика

Кинематическая связь между приводными катками 14 и приводными колёсами 15 обеспечивается коническим редуктором 27 размещенным на средней части оси 26 и вала конического редуктора 25, соединенного муфтой сцепления 24 с входным валом 23 червяка 22 входящего в зацепление с червячным колесом 21 червячного редуктора 20 установленного на оси приводных колёс 19 самоходной платформы.

Установленная система управления тормозами перемещаемых вагонов содержит кран управления пневматической системы 7, компрессор 8 размещенный на вилочном погрузчике 3, манометр 6, главный воздушный резервуар 9, отсечной кран на пневматическом рукаве 11, гибкий междувагонный соединительный пневматический рукав 13, головка 16 соединенная с тормозной магистралью вагона 17.

Привод компрессора содержит вал отбора мощности (ВОМ) от двигателя погрузчика 28 и от трансмиссии погрузчика соединенный с одной стороны промежуточной шестерней ВОМ 42 установленной на оси 31с ведущей шестерней 30 коробки переключений передач (КПП) 29, с другой стороны – соединенный вторичным валом 40 соосно с ведущим шкивом 35 кинематически связанным клиновыми ремнями 36 с ведомым шкивом 37, установленном на валу 38 компрессора 8.

Вал отбора мощности состоит из корпуса ВОМ 32 размещенным в нем промежуточной шестерни ВОМ 42, установленной на оси 31 и вторичного вала 40 со шлицами 41, установленного в нем подвижной шестерни 33 с кареткой 34, выполненной с пазами 39, приводимой в движением рычагом управления каретки 5.

Отличительным признаком новизны маневрового устройства является то, что дополнительно: введен вал отбора мощности (ВОМ) от двигателя погрузчика соединённый с одной стороны промежуточной шестерней установленной на оси с ведущей шестерней коробки переключения передач, с другой стороны – соединенный вторичным валом соосно с ведущим шкивом кинематически связанным клиновыми ремнями с ведомым шкивом, установленным на валу компрессора, содержащий корпус ВОМ размещенным в нем промежуточной шестерни ВОМ установленной на оси и вторичного вала со шлицами, установленного в нем подвижной шестерни с кареткой, выполненной с пазами, приводимой в движение рычагом управления каретки.

Самоходная тележка дополнительно оборудована червячным редуктором, установленным на оси приводных колёс, содержащим червячное колесо и червяк, входной вал, которого соосно соединен муфтой сцепления с валом конического редуктора, размещенным на оси приводных катков.

Коробка отбора мощности позволяет производить отбор энергии от коробки передачи трансмиссии погрузчика, что даёт возможность исключить электрический генератор из системы управления тормозами и повысить мощность эффективной работы компрессора. Рычаг управления кареткой обеспечивает включение/выключение вала отбора мощности на холостых оборотах двигателя вилочного погрузчика.

Особенностью червячной передачи является то, что вращение может передаваться только от червяка к червячному колесу, но не наоборот. Это связано с особенностями геометрии винтовой поверхности червяка и червячного колеса [6]. Эффект самоторможения червячного редуктора позволяет обеспечить надежное стопорение колёс самоходной платформы при заезде на неё вилочного погрузчика и исключить затормаживание платформы вручную.

Работа маневрового устройства происходит следующим образом.

На самоходную площадку 12 по мостику 10 переднем ходом заезжает мобильное транспортное средство 3. На платформе 12 погрузчик занимает рабочее положение посредством центрирования передних колёс 4 на приводных катках 14, передающие крутящий момент на приводные колёса 15 самоходной платформы 12 через конический редуктор 27 размещенный на оси приводных катков 26 кинематически связанный посредством вала 25 и муфты сцепления 24 с входным валом 23 червяка 22 червячного редуктора 20 установленного на оси приводных колёс самоходной платформы 19.

При работе червячного редуктора 20 движение производится только от червяка 22 к червячному колесу 21 при передаче движения в обратном направлении происходит эффект самоторможения. Это позволяет обеспечить стопорение приводных колёс самоходной платформы 15 при заезде на неё вилочного погрузчика 3и исключить затормаживание платформы12 вручную. Оператор погрузчика посредством подъема вил 18 в прижимном устройстве 2 обеспечивает прижатие передних колёс вилочного погрузчика 4 к приводным каткам 14. После поднятия трапа 10, и соединения маневрового устройства с вагоном штатной автосцепкой 28 - устройство готово к эксплуатации.

Подключение компрессора к штатной воздушной арматуре и зарядка пневматической магистрали грузового вагона осуществляется так. Гибкий междувагонный соединительный пневматический рукав 13 посредством головки 16 соединяют с тормозной магистралью вагона 17.

Торможение перемещаемых вагонов обеспечивается от компрессора (мод. ВВ 08/8-720) 8, установленного на вилочном погрузчике 3 [5]. Передача мощности может осуществляться от ведущей шестерни КПП 30 трансмиссии погрузчика на промежуточную шестерню ВОМ 42 установленной на оси 31.Ведущая шестерня 30 коробки переключения передач 29, и промежуточная шестерня ВОМ 42 находятся в постоянном зацеплении друг с другом, и включение отбора мощности производится кареткой 34. Каретка 34 по шлицам 41 передвигается по ведомому валу 40 рычагом управления 5, который входит в корпус ВОМ 32 и упирается в паз 39. При этом вместе с кареткой 34 перемещается и подвижная шестерня 33, образуя зацепление с промежуточной шестерней 42.

Включение/отключение вала отбора мощности производится с места водителя вилочного погрузчика 3 на холостом ходу двигателя 28 с преобразованием вращательного момента ведущей шестерни 30 коробки переключения передач 29 на вторичный вал ВОМ 40 и далее через ведущий

шкив 35, клиновые ремни 36 на ведущий шкив 37 вала компрессора 38.

Затем оператор переводит кран управления пневматической системы 7 в вертикальное положение для наполнения сжатым воздухом главного воздушного резервуара 9 [7]. После заполнения главного резервуара 9 потребным объемом воздуха открывается отсечной крана 11 на пневматическом рукаве 13 и производится подача сжатого воздуха в тормозную магистраль 17 вагона, давление контролируется при помощи манометра 6. В результате чего перемещаемый маневровым устройством вагон или группа вагонов производит торможение за счёт собственного тормоза от компрессора 8 с приводом вала отбора мощности от двигателя погрузчика 28. Для оценки влияния маневровой работы с применением автономных маневровых устройств может быть введен синтетический критерий *FS*, состоящий из подкритериев $FK_{\text{ваг}}$, $FK_{\text{ман}}$, $FK_{\text{жд}}$, $FK_{\text{орг}}$.

Выбор этих подкритериев включает в себя меры оценки. Схематично расположение показателей показано на рис.3. Как показатели, так и подкритерии требуют определения их веса при оценке, который может быть определен с помощью опросов или интервью с экспертами (a -для критериев, b- для показателей). Разработанные критерии позволяют оценить технологический процесс обработки грузовых вагонов с использованием маневровых тягачей по шкале от 0 до 1. Чем выше значение, тем лучше внедрение. Такой подход позволяет, с одной стороны, четко отслеживать влияние вносимых изменений на процесс, а с другой - глобально сравнивать решения с различными задачами и масштабами на основе критерия *FS*. Синтетический критерий может быть записан в виде:

$$FS = \left(FK_{\text{ваг}} \times a_{\text{ваг}} + FK_{\text{ман}} \times a_{\text{ман}} + FK_{\text{жд}} \times a_{\text{жд}} + FK_{\text{орг}} \times a_{\text{орг}}\right), \quad (1)$$

Следующие компоненты синтетического критерия имеют следующие интерпретации:

$FK_{\text{ваг}}$ – определяет количественные и качественные характеристики объекта маневровой работы. Этот показатель основан на учете количества перемещаемых вагонов и их технического состояния. Данный подкритерий имеет вид:

$$FK_{\text{ваг}} = \left(FM_{\text{ваг}} \times b_{\text{ваг}1} + FM_{\text{ваг}} \times b_{\text{ваг}2} + FM_{\text{ваг}} \times b_{\text{ваг}3}\right), \quad (2)$$

при этом должно соблюдаться условие:

$$\begin{cases} b_{\text{ваг}1} + b_{\text{ваг}2} + b_{\text{ваг}3} = 1 \\ 0 \le b_{\text{ваг}1}, b_{\text{ваг}2}, b_{\text{ваг}3} \le 1 \end{cases} \quad (3)$$

$FK_{\text{ман}}$ – определяет эффективность использования маневровых тягачей во времени. Показатель $FK_{\text{ман}}$ – характеризует ещё и как коэффициент полезного действия маневрового устройства при пробеге т.е. мощность требуемую для совершения тяговой работы по перемещению вагонов. Этот показатель взвешивается по количеству маневровых тягачей используемых в работе. Учитывая выше изложенное, подкритерий принимает следующий вид:

$$FK_{\text{ман}} = \left(FM_{\text{ман}} \times b_{\text{ман}1} + FM_{\text{ман}} \times b_{\text{ман}2} + FM_{\text{ман}} \times b_{\text{ман}3}\right), \quad (4)$$

при этом должно соблюдаться условие:

$$\begin{cases} b_{\text{ман}1} + b_{\text{ман}2} + b_{\text{ман}3} = 1 \\ 0 \le b_{\text{ман}1}, b_{\text{маг}2}, b_{\text{ман}3} \le 1 \end{cases} \quad (5)$$

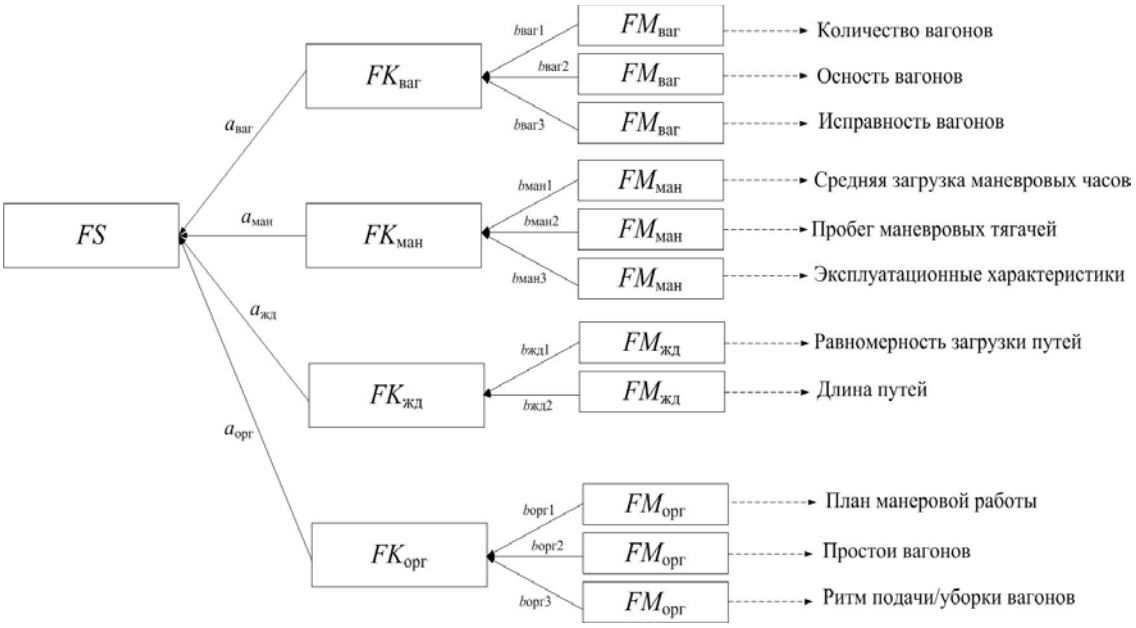


Рис. 3. Схема мероприятий по оценке эффективности использования предлагаемого маневрового устройства

$FK_{\text{жд}}$ – определяет эффективность использования железнодорожных путей для выполнения маневровой работы. Этот показатель зависит от технико-эксплуатационных характеристик путей. Данный подкритерий имеет вид:

$$FK_{\text{жд}} = \left(FM_{\text{жд}} \times b_{\text{жд}1} + FM_{\text{жд}} \times b_{\text{жд}2}\right), \quad (6)$$

при этом должно соблюдаться условие:

$$\begin{cases} b_{жд1} + b_{жд2} = 1 \\ 0 \le b_{жд1}, b_{жд2} \le 1 \end{cases} \quad (7)$$

$FK_{\text{орг}}$ – эффективность передвижений грузовых вагонов с учетом плана маневровой работы и связанных с ним показателями. Данный подкритерий имеет вид:

$$FK_{\text{орг}} = \left(FM_{\text{орг}} \times b_{\text{орг}_1} + FM_{\text{орг}} \times b_{\text{орг}_2} + FM_{\text{орг}} \times b_{о\text{рг}3}\right), \quad (8)$$

при этом должно соблюдаться условие:

$$\begin{cases} b_{о\text{рг}1} + b_{\text{орг}2} + b_{\text{орг}3} = 1 \\ 0 \le b_{\text{орг}1}, b_{\text{орг}2}, b_{\text{орг}3} \le 1 \end{cases} \quad (9)$$

Результаты экспертной оценки эффективности применения маневрового устройства приведены в таблице.

Предложено маневровое устройство для механизации работ по передвижению вагонов на путях необщего пользования промышленных предприятий и прирельсовых складов способно эффективно функционировать без привлечения парковых локомотивов.

Экспертная оценка с использованием синтетического коэффициента показала, что эффективность применения маневрового устройства с системой торможения от компрессора выше за счёт повышения управляемости маневровых перемещений. Производительность компрессора мод. ВВ 08-08-720 обеспечивает быструю и эффективную зарядку воздухом тормозной магистрали вагона в пределах нормативных значений по зарядному давлению. Привод компрессора реализован от вала отбора мощности погрузчика, что не требует внешнего источника питания и громоздких аккумуляторных батарей требующих регулярного обслуживания.

Экспертная оценка веса критериев эффективности применения маневрового устройства

Критерий/подкритерий	Маневровое устройство	
	Вариант №1 (без системы управления тормозов)	Вариант №2 (с системой управления тормозами)
$FK_{ваг}$	0,1	0,09
$FM_{ваг1}$	0,06	0,06
$FM_{ваг2}$	0,02	0,02
$FM_{ваг3}$	0,02	0,01
$FK_{ман}$	0,2	0,26
$FM_{ман1}$	0,07	0,09
$FM_{ман2}$	0,1	0,1
$FM_{ман3}$	0,03	0,01
$FK_{жд}$	0,18	0,18
$FM_{жд1}$	0,07	0,07
$FM_{жд2}$	0,11	0,11
$FK_{орг}$	0,26	0,29
$FM_{орг1}$	0,13	0,13
$FM_{орг2}$	0,1	0,14
$FM_{орг3}$	0,03	0,03
Синтетический критерий *FS*	0,74	0,82

Новым техническим решением и использование червячного редуктора для самоторможения самоходной платформы при размещение погрузчика в рабочем положении. Все эти меры позволят сократить время проведения маневровых операций и ускорить оборот вагонов.

Развитием предложенного маневрового устройства может быть оснащение его толкателем для импульсного сжатия поглощающего аппарата, что улучшит условия трогания с места самоходной платформы.

Список литературы

1. Обзор работы грузового железнодорожного транспорта за 6 месяцев 2024 года. М.: СОЖТ, 2024 28 с.

2. Нормы времени на выполнения на маневровые работы, выполняемые на железнодорожных станциях ОАО «РЖД». М.: ОАО «РЖД», 2006. 102 с.

3. А.с. 1705163, СССР, МКИ В25 J 15/00. Маневровое устройство. Ю.В. Гутман, С.В. Ли, А.В. Голенко (СССР) №4773528/11; заявл. 28.11.89; опубл. 15.01.92, Бюл. №2. 2 с.

4. Клюканов А.В. К вопросу модернизации тяговой передачи маневрового устройства передвижения грузовых вагонов // Наука и образо-

вание транспорту. 2020. №1. С.47-50.

5. Клюканов А.В. Тяговое транспортное средство для проведения маневровых работ на путях необщего пользования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 2. С. 492-496.

6. Чернавский С.А. Проектирование механических передач: учебное пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. М.: Транспорт, 1976. 608 с.

7. Крылов В.И. Тормозное оборудование железнодорожного подвижного состава / В.И. Крылов, В.В. Крылов, В.Н. Ефремов, П.Т. Демушкин. М.: Транспорт, 1989. 487 с.

Клюканов Алексей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, kav.samara@mail.ru, Россия, Самара, Приволжский государственный университет путей сообщения

WAGON SHUNTING DEVICE AND EVALUATION OF ITS EFFECTIVENESS ON PUBLIC TRACKS

A.V. Klyukanov

The paper highlights the relationship between the technological turnover of railcars and the quality of shunting operations. It is proposed to use a shunting device with the ability to perform braking of the moved cars on the non-use tracks of industrial enterprises, as well as to move cars during loading and unloading operations in the areas of rail yards. The design features of the shunting device are considered and the compressor is selected. There is an estimation of efficiency of freight cars shunting device application on the basis of expert analysis taking into account the proposed synthetic coefficient. Recommendations for further modernization of shunting device are given.

Key words: shunting work, wagon turnover, shunting device, self-propelled platform, forklift, wagon brake control system, compressor, power take-off shaft.

Klyukanov Alexey Vasilyevich, candidate of technical sciences, docent, kav.samara@mail.ru, Russia,Samara, Volga State Transport University (TSTU)

УДК 621.77
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-624-625

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ТРУБ-ЗАГОТОВОК ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Д.Е. Бочкова, М.Н. Бобков, В.Д. Артамонов

При изготовлении цилиндрических деталей с центральным отверстием в ряде случаев в качестве исходных заготовок целесообразно применять стандартные стальные трубы. При этом для расчёта размеров заготовки можно использовать аналитический метод определения припусков на обработку резанием. Описана последовательность расчёта размеров трубы-заготовки на примере конкретной детали.

Ключевые слова: труба-заготовка, припуск на обработку, составляющие припуска, размеры заготовки.

В машиностроении довольно широкое распространение получили детали с центральным отверстием типа втулок, гильз, шпинделей и т.п. В ряде случаев в качестве исходных заготовок для таких деталей рационально использовать стальные горячедеформированные трубы [1]. Поскольку диапазон размеров этих труб достаточно широк, встаёт вопрос точного определения размеров заготовки для конкретной детали. С этой целью может быть применён аналитический метод расчёта припусков [2]. Последовательность определения размеров трубы-заготовки с помощью данного метода рассмотрим на примере детали «Гильза» (рис. 1).

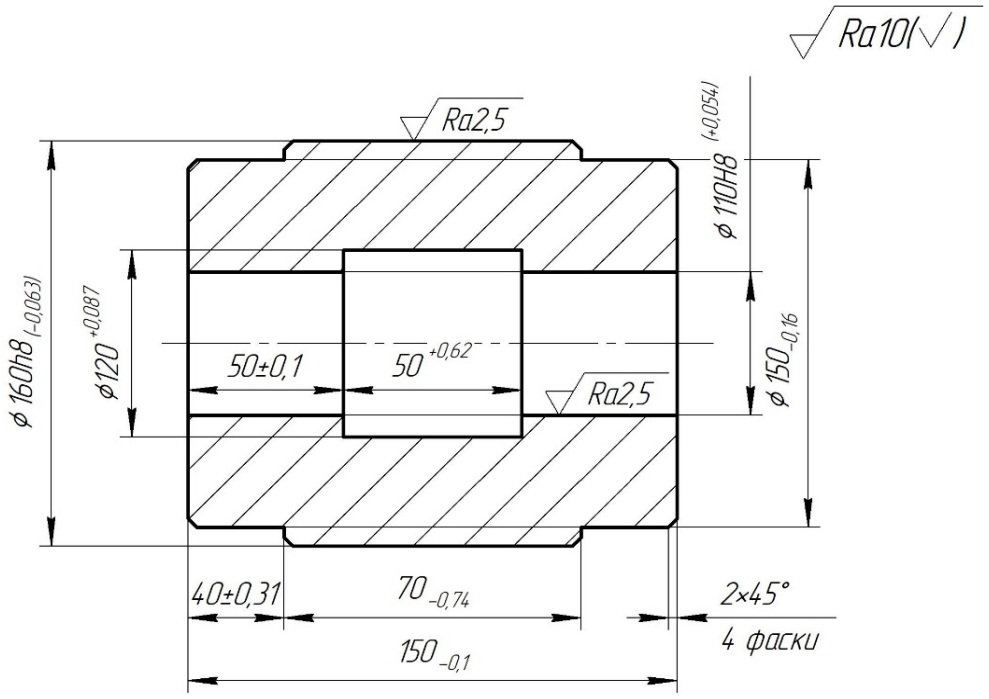


Рис. 1. Эскиз детали «Гильза»

Исходные данные для расчёта:

- заготовка – стальная бесшовная горячедеформированная труба [3] для изготовления деталей механической обработкой [1];
- материал заготовки сталь 45;
- твёрдость металла заготовки 143…207 НВ.

Последовательность обработки заготовки:

- резка заготовок на дисковой пиле;
- токарная обработка торцов и поверхностей вращения заготовки за два установа (рис. 2, 3) в трёхкулачковом самоцентрирующем патроне на токарном станке.

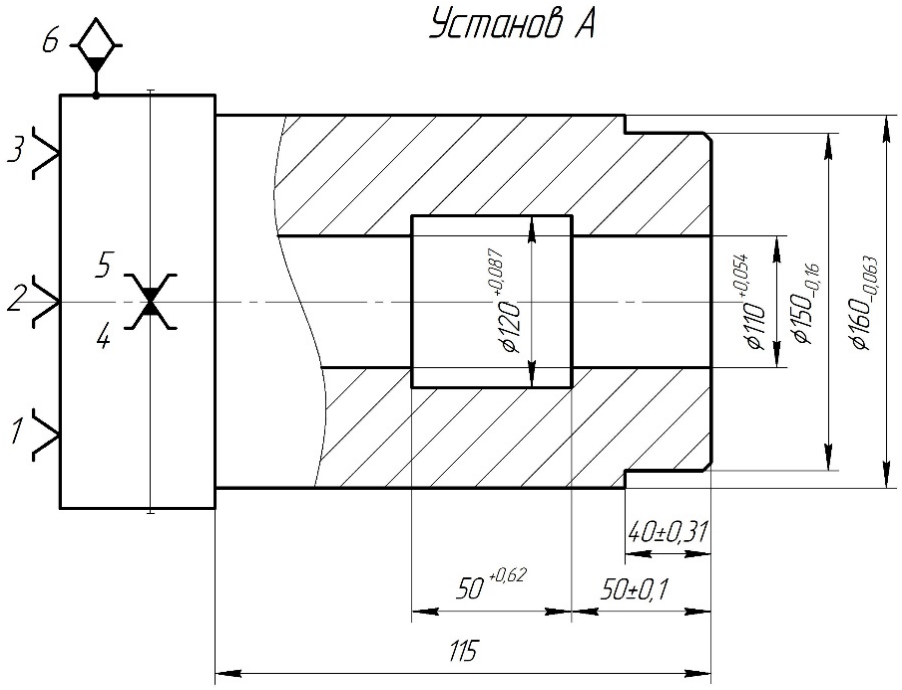


Рис. 2. Операционный эскиз для установа А токарной операции

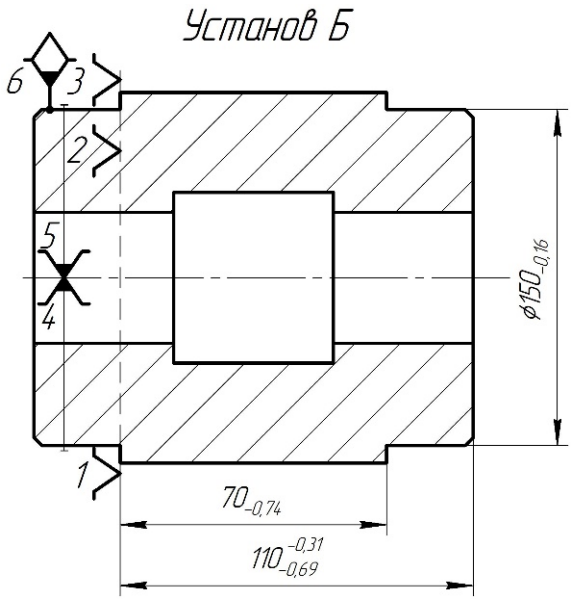


Рис. 3. Операционный эскиз для установа Б токарной операции

1 Черновое подрезание правого торца заготовки.

2 Обтачивание поверхности $\phi 150_{-0,16}$ *мм*.

3 Обтачивание поверхности $\phi 160_{-0,063}$ *мм*.

4 Растачивание центрального отверстия $\phi 110^{+0,054}$ *мм*.

5 Растачивание отверстия $\phi 120^{+0,087}$ *мм*.

6 Подрезание левого торца заготовки в размер $110^{-0,31}_{-0,69}$ *мм*.

7 Обтачивание поверхности $\phi 150_{-0,16}$ *мм*.

Для определения значения операционного припуска следует использовать вероятностный метод расчёта [2]. В соответствии с этим методом формулы суммирования составляющих операционного припуска будут иметь вид:

- для одностороннего припуска

$$z_i = k\sqrt{R^2_{z(i-1)} + h^2_{i-1} + \Delta^2_{i-1} + \rho^2_{i-1} + \varepsilon^2_i}, \quad (1)$$

- для двустороннего припуска

$$z_i = k\sqrt{T^2_{i-1} + 4(R^2_{z(i-1)} + h^2_{i-1} + \Delta^2_{i-1} + \rho^2_{i-1} + \varepsilon^2_i)}, \quad (2)$$

где z_i - припуск на обработку поверхности заготовки на данной операции (переходе); k =1,2…1,3 – коэффициент, характеризующий законы распределения величин составляющих припуска; T_{i-1} – допуск на размер поверхности заготовки на предшествующей операции (переходе); $R_{z(i-1)}$ – шероховатость поверхности заготовки после предшествующей операции; h_{i-1} – глубина поверхностного дефектного слоя заготовки после предшествующей операции; Δ_{i-1} – составляющая припуска, учитывающая возможное смещение поверхности заготовки, подлежащей обработке, относительно технологической базы заготовки; ρ_{i-1} – составляющая припуска, учитывающая пространственные геометрические отклонения поверхности заготовки после предшествующей операции; ε_i – составляющая припуска, учитывающая погрешность установки заготовки в приспособлении на выполняемой операции.

В соответствии с формулой (1) односторонний припуск на обработку правого торца заготовки

$$z_{T1} = k\sqrt{R^2_{zT} + h^2_T + \Delta^2_{T1} + \rho^2_T + \varepsilon^2_T}.$$

При отрезке заготовки трубы на дисковой пиле составляющие R_{zT} и h_T в совокупности равны 200 мкм [4], а отклонения на длину заготовки в пределах $\pm 1{,}4$ *мм* [4]. Поскольку в расчёт принимают только нижнее отклонение [2], при подрезке правого торца составляющая припуска $\Delta_{T1} = 1400$ *мкм*.

Искривление оси заготовки приводит к тому, что её торец становится неперпендикулярным к оси вращения заготовки, что также должно быть учтено при определении составляющей припуска на подрезку правого торца [2, с. 133]

$$\rho_T = \rho_{неп} = \frac{2 \cdot \rho_o \cdot l_k}{L} \cdot D, \qquad (3)$$

где ρ_0 – удельная кривизна заготовки, мкм/мм; l_k – расстояние от обрабатываемой торцовой поверхности до места крепления заготовки в патроне, мм; L – длина заготовки, мм; D – диаметр обрабатываемой торцовой поверхности, мм.

Кривизна трубы с толщиной стенки свыше 30 мм – не более 4 мм на 1 метр длины [1]. Следовательно, удельная кривизна $\rho_0 = \frac{2 \cdot 4}{1000} = 0{,}008,$ то есть 8 мкм на 1мм длины заготовки [5].

В данном случае $l_k = L,$ поэтому формула (3) примет вид

$$\rho_T = 2 \cdot \rho_0 \cdot D = 2 \cdot 8 \cdot 160 = 2560 \text{ мкм.}$$

Погрешность базирования заготовки в осевом направлении $\varepsilon_б = 0,$ поскольку измерительная и технологическая базы заготовки совпадают. Погрешность закрепления в осевом направлении при установке заготовки в трёхкулачковом самоцентрирующем патроне $\varepsilon_з = 130$ *мкм* [2]. Так как обработка всех заготовок производится в одном патроне, погрешность положения установочных элементов приспособления $\varepsilon_n = 0.$ Следовательно, погрешность установки заготовки $\varepsilon_T = \varepsilon_з = 130$ *мкм.*

Таким образом, припуск на обработку правого торца заготовки

$$z_{T1} = 1{,}2\sqrt{200^2 + 1400^2 + 2560^2 + 130^2} = 3513 \text{ мкм} \text{ или } 3{,}51 \text{ мм.}$$

При обработке левого торца заготовки на втором установе составляющие припуска R_{zT} и h_T также равны 200 мкм. Технологический допуск на длину заготовки после подрезки правого торца соответствует 12 квалитету [4, с. 328, табл. 5] и равен 530 мкм [6, с. 19, табл. 2.2]. Поэтому составляющая припуска $\Delta_{T2} = 530$*мкм.*

Составляющая припуска, учитывающая неперпендикулярность левого торца заготовки к оси её вращения $\rho_{неп} = 2560$ *мкм.*

Погрешность установки заготовки в осевом направлении при обработке левого торца $\varepsilon_T = \varepsilon_з = 130$ *мкм.*

Припуск на обработку левого торца заготовки

$$z_{T2} = 1{,}2\sqrt{200^2 + 530^2 + 2560^2 + 130^2} = 3150 \text{ мкм} \quad \text{или} \quad 3{,}15 \text{ мм.}$$

Общий припуск на обработку двух торцов заготовки

$$z_0 = z_{T1} + z_{T2} = 3{,}51 + 3{,}15 = 6{,}66 \text{ мм.}$$

Расчётную величину общего припуска округлим в сторону его увеличения до ближайшего целого числа, то есть до 7 мм. Номинальный размер заготовки

$$L_{заг} = 150 + 7 = 157 \text{ мм}.$$

С учётом допускаемых отклонений длина заготовки $(157 \pm 1{,}4)$ *мм*.

Заданные точность поверхности детали $\phi 160_{-0{,}063}$ *мм* и шероховатость $R_a = 2{,}5$ *мкм* можно обеспечить тонким обтачиванием [4], которому предшествуют черновое (квалитет h12) и чистовое (квалитет h10) точения поверхности.

В соответствии с выражением (2) двусторонний припуск на черновое точение заготовки

$$z_1 = k\sqrt{T_{заг}^2 + 4(R_{zзаг}^2 + h_{заг}^2 + \Delta_{заг}^2 + \rho_{заг}^2 + \varepsilon_1^2)}.$$

Предельные отклонения наружной поверхности горячедеформированной трубы обычной точности изготовления диаметра свыше 50 до 219 мм не должны превышать $\pm 1{,}0\%$ от диаметра [3]. Для трубы диаметра 160 мм это $\pm 1{,}60$ мм. Поскольку в расчёт принимают только нижнее отклонение, $T_{заг} = 1600$ *мкм*.

Составляющие припуска $R_{zзаг} = 200$ *мкм* и $h_{заг} = 300$ *мкм* [4].

Составляющая припуска $\Delta_{заг} = 0$, поскольку обрабатываемая поверхность является технологической базой заготовки (см. п. 2 примеч. к табл. 41 - 48) [2].

Составляющая припуска, учитывающая кривизну заготовки при её консольной установке,

$$\rho_{заг} = 2 \cdot \rho_o \cdot l = 2 \cdot 8 \cdot 110 = 1760 \text{ мкм},$$

где $l = 150 - 40 = 110$ – длина обрабатываемой консольной части заготовки (см. рис. 1), мм.

Погрешность базирования $\varepsilon_{б1}$ (в данном случае несовпадение оси технологической базы заготовки и оси вращения патрона) может быть вызвана при установке заготовки по необработанной поверхности овальностью поперечного сечения трубы. В соответствии со стандартом [3] овальность трубы не должна превышать допуск на размер трубы, то есть 3,20 мм. При этом погрешность базирования (см. схему 4Б в табл. 80) [2]

$$\varepsilon_{б1} = 0{,}29T_o = 0{,}29 \cdot 3{,}20 = 0{,}928 \text{ мм},$$

где $T_o = 3{,}20$ – овальность (допуск круглости) поперечного сечения трубы, мм.

Погрешность закрепления горячедеформированной заготовки в самоцентрирующем патроне $\varepsilon_{з1} = 600$ *мкм* [2], погрешность положения установочных элементов приспособления $\varepsilon_{п1} = 0$. Поэтому погрешность установки заготовки в радиальном направлении

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\varepsilon_{б1}^2 + \varepsilon_{з1}^2} = \sqrt{928^2 + 600^2} = 1105 \text{ мкм}.$$

Двусторонний припуск на черновое обтачивании поверхности трубы

$$z_1 = 1{,}2\sqrt{1600^2 + 4(200^2 + 300^2 + 1760^2 + 1105^2)} = 5414 \text{ мкм} = 5{,}41 \text{ мм}.$$

При черновой обработке наружной цилиндрической поверхности с точностью по 12 квалитету допуск равен 400 мкм [6]. Следовательно, составляющая припуска T_1 для чистового точения поверхности трубы ϕ 160 *мм* также равна 400 мкм.

Шероховатость наружной поверхности заготовки после черновой обточки $R_{z1} = 63$ *мкм*, глубина дефектного слоя $h_1 = 60$ *мкм* [4], составляющая припуска $\Delta_1 = 0$.

В соответствии с законом технологической наследственности составляющая припуска, учитывающая остаточную кривизну заготовки после черновой обработки [2, с. 27],

$$\rho_1 = k_y \cdot \rho_{заг} = 0{,}06 \cdot 1760 = 106 \text{ мкм},$$

где $k_y = 0{,}06$ - коэффициент уменьшения погрешности при черновом точении заготовки из проката [4, с. 338, табл. 29].

Поскольку чистовое обтачивание наружной поверхности осуществляется с одного установа с черновым обтачиванием этой поверхности, погрешность базирования $\varepsilon_{б2}$, погрешность закрепления $\varepsilon_{з2}$ и погрешность установочных элементов приспособления $\varepsilon_{п2}$ равны 0.

Двусторонний припуск на чистовое обтачивание наружной цилиндрической поверхности ϕ160 *мм*

$$z_2 = k\sqrt{T_1^2 + 4(R_{z1}^2 + h_1^2 + \rho_1^2)} =$$

$$= 1{,}2\sqrt{400^2 + 4(63^2 + 60^2 + 106^2)} = 582 \text{ мкм} = 0{,}58 \text{ мм}.$$

При чистовой обработке наружной цилиндрической поверхности ϕ 160 *мм* с точностью по 10 квалитету допуск составляет 160 мкм [6, с. 17, табл. 2.1]. Следовательно, составляющая припуска T_2 для тонкого обтачивания этой поверхности равно 160 мкм.

Шероховатость наружной поверхности после чистового точения $R_{z2} = 32$ *мкм*, глубина дефектного слоя $h_2 = 30$ *мкм* [4, с. 328, табл. 5], составляющая припуска $\Delta_2 = 0$.

Составляющая припуска, определяемая кривизной заготовки после чистовой обработки,

$$\rho_2 = k_y \cdot \rho_1 = 0{,}04 \cdot 106 = 4{,}24 \text{ мкм}.$$

Эту составляющую припуска из-за её малости принимаем равной нулю.

Погрешность установки заготовки при тонком обтачивании $\varepsilon_з = 0$.

Двусторонний припуск на тонкое обтачивание наружной цилиндрической поверхности заготовки

$$z_3 = k\sqrt{T_2^2 + 4(R_{z2}^2 + h_2^2)} = 1{,}2\sqrt{160^2 + 4(32^2 + 30^2)} = 219 \text{ мкм} = 0{,}219 \text{ мм}.$$

Операционные размеры и размер наружной поверхности исходной заготовки:

1) операционный размер после чистового обтачивания заготовки

$$D_2^{'} = D_{з_{\max}} + z_з = 160 + 0{,}219 = 160{,}219 \text{ мм}.$$

С учётом допуска на размер, получаемый после чистового обтачивания, имеем

$$D_2 = 160{,}22_{-0{,}16} \text{ мм}.$$

2) расчётный номинальный размер после чернового обтачивания заготовки

$$D_1^{'} = D_2^{'} + z_2 = 160{,}219 + 0{,}58 = 160{,}799 \text{ мм}.$$

Округлив расчётный размер, получим

$$D_1 = 160{,}80_{-0{,}4} \text{ мм}.$$

3) наружный размер заготовки

$$D_{заг}^{'} = D_1^{'} + z_1 = 160{,}799 + 5{,}41 = 166{,}209 \text{ мм}.$$

По стандарту [1] ближайший больший наружный диаметр трубы 168 мм.

Требуемую точность поверхности центрального отверстия $\phi 110^{+0{,}054}$ *мм* и шероховатость $R_a = 2{,}5$ *мкм* можно обеспечить тонким растачиванием [2], которому предшествует черновое (квалитет 12) и чистовое (квалитет 10) растачивание [4].

Двусторонний припуск на черновое растачивание отверстия

$$z_1 = k\sqrt{T_{заг}^2 + 4(R_{z\,заг}^2 + h_{заг}^2 + \Delta_{заг}^2 + \rho_{заг}^2 + \varepsilon_1^2)}.$$

Предельные отклонения диаметра отверстия трубы не должны превышать соответствующих предельных отклонений наружного диаметра трубы [3, с. 13, п. 9]. Поэтому в качестве составляющей припуска $T_{заг}$ примем верхнее отклонение диаметра отверстия трубы, равное 1600 мкм.

Составляющие припуска $R_{z\,заг} = 200$ *мкм* и $h_{заг}$=300 мкм [4].

В качестве составляющей припуска $\Delta_{заг}$ следует принять отклонение от соосности отверстия и наружной поверхности трубы, равное отклонению толщины стенки трубы (см. п. 5 примеч. к табл. 13) [2]. Предельные отклонения толщины стенки трубы обычной точности изготовления при толщине стенки от 15 до 30 мм не должны превышать $\pm 12{,}5\%$ толщины стенки [3]. В данном случае предельные отклонения толщины стенки трубы не должны превышать $\pm (25 \cdot 0{,}125) = 3{,}125$ *мм*. Поэтому $\Delta_{заг} = 3125$ *мкм*.

Составляющая припуска, учитывающая кривизну заготовки,

$$\rho_{заг} = 2 \cdot \rho_0 \cdot L = 2 \cdot 8 \cdot 150 = 2400 \text{ мкм}.$$

Погрешность установки заготовки в радиальном направлении $\varepsilon_1 = 1105$ *мкм*.

Двусторонний припуск на черновое растачивание отверстия

$$z_1 = 1{,}2\sqrt{1600^2 + 4(200^2 + 300^2 + 3125^2 + 2400^2 + 1105^2)} =$$

$$= 10045\ мкм = 10{,}045\ мм.$$

При черновом растачивании отверстия с точностью по 12 квалитету допуск составляет 350 мкм [6]. Поэтому составляющая припуска T_1 для чистового растачивания отверстия трубы $\phi 110\ мм$ равна 350 мкм.

Шероховатость поверхности отверстия после чернового растачивания $R_{z1} = 40\ мкм$, глубина дефектного слоя $h_1 = 50\ мкм$ [4].

После чернового растачивания составляющая припуска Δ_1 будет уменьшенной копией $\Delta_{заг}$, то есть

$$\Delta_1 = k_y \cdot \Delta_{заг} = 0{,}06 \cdot 3125 = 188\ мкм.$$

Составляющая припуска, учитывающая остаточную кривизну отверстия заготовки после черновой обработки,

$$\rho_1 = k_y \cdot \rho_{заг} = 0{,}06 \cdot 2400 = 144\ мкм.$$

Погрешность установки заготовки при чистовом растачивании отверстия $\varepsilon_2 = 0$.

Двусторонний припуск на чистовое растачивание отверстия

$$z_2 = k\sqrt{T_1^2 + 4(R_{z1}^2 + h_1^2 + \Delta_1^2 + \rho_1^2)} =$$

$$= 1{,}2\sqrt{350^2 + 4(40^2 + 50^2 + 188^2 + 144^2)} = 723\ мкм = 0{,}72\ мм.$$

При чистовом растачивании отверстия с точностью по 10 квалитету допуск составляет 140 мкм [6]. Поэтому составляющая припуска T_2 для тонкого растачивания отверстия также равна 140 мкм.

Шероховатость поверхности отверстия после чистового растачивания $R_{z2} = 20\ мкм$, глубина дефектного слоя $h_2 = 20\ мкм$ [4, с. 338, табл. 27].

Составляющая припуска, учитывающая остаточное отклонение толщины стенки трубы после чистового растачивания отверстия,

$$\Delta_2 = k_y \cdot \Delta_1 = 0{,}04 \cdot 188 = 7{,}52\ мкм \approx 8\ мкм.$$

Составляющая припуска, учитывающая остаточную кривизну отверстия после чистовой обработки,

$$\rho_2 = k_y \cdot \rho_1 = 0{,}04 \cdot 144 = 5{,}76\ мкм \approx 6\ мкм.$$

Погрешность установки заготовки при тонком растачивании отверстия трубы $\varepsilon_з = 0$.

Двусторонний припуск на тонкое растачивание отверстия

$$z_3 = 1{,}2\sqrt{140^2 + 4(20^2 + 20^2 + 8^2 + 6^2)} = 183\ мкм = 0{,}183\ мм.$$

Операционные размеры и размер отверстия заготовки:

1) операционный размер после чистового растачивания отверстия

$$d_2^{'} = d_{з\min} - z_з = 110 - 0{,}183 = 109{,}817\ мм.$$

С учётом допуска на размер, получаемый после чистового растачи-

вания, имеем

$$d_2 = 109{,}82^{+0{,}14} \text{ мм.}$$

2) расчётный номинальный размер после чернового растачивания отверстия

$$d_1^{'} = d_2^{'} - z_2 = 109{,}817 - 0{,}723 = 109{,}094 \text{ мм.}$$

Округлив расчётный размер, получим

$$d_1 = 109{,}09^{+0{,}35} \text{ мм.}$$

3) размер отверстия заготовки трубы

$$d_{заг}^{'} = d_1^{'} - z_1 = 109{,}094 - 10{,}045 = 99{,}049 \text{ мм.}$$

По стандарту [1] ближайшая подходящая по размеру труба с толщиной стенки 35 мм. При этом номинальный диаметр отверстия трубы 98 мм. В соответствии со стандартом условное обозначение выбранной исходной заготовки из стали 45:

Труба 168х35 - 45 ГОСТ 23270-89.

Список литературы

1 ГОСТ 23270-89. Трубы-заготовки для механической обработки. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1989. 19 с.

2 Коганов И.А., Станкеев А.А. Расчёт припусков на механическую обработку: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Тула: Изд-во ТПИ, 1973. 191 с.

3 ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент. М.: Изд-во стандартов, 1991. 15 с.

4 Справочник технолога-машиностроителя: В 2 т. Т.1 / А.М. Дальский [и др.]; под ред. А.М. Дальского [и др.]. М.: Машиностроение-1, 2001. 912 с.

5 Кован В.М. Расчёт припусков на обработку в машиностроении: справ. пособие. М.: Машгиз, 1953. 207 с.

6 Расчёт припусков и межпереходных размеров в машиностроении: учеб. пособие для вузов / Я.М. Радкевич [и др.]; под ред. В.А. Тимирязева. М.: Высш. шк., 2004. 272 с.

7 Косилова А.Г., Мещеряков М.А., Калинин Р.К. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении: справочник технолога. М.: Машиностроение, 1976. 288 с.

Бочкова Дина Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент, bochkovade@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Бобков Михаил Николаевич, д-р техн. наук, проф., dotdash2080@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Артамонов Валерий Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DETERMINATION OF DIMENSIONS OF PIPE BLANKS FOR MECHANICAL PROCESSING

D.E. Bochkova, M.N. Bobkov, V.D. Artamonov

When manufacturing cylindrical parts with a central hole, in some cases it is recommended to use standard steel pipes as initial blanks. In this case, to calculate the dimensions of the workpiece, you can use the analytical method for determining allowances for cutting processing. The sequential calculation of the dimensions of a pipe blank for the type of specific part is described.

Key words: blank pipe, processing allowance, allowance elements, blank dimensions.

Bochkova Dina Evgenevna, candidate of technical sciences, docent, bochkovade@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Bobkov Mikhail Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, dotdash2080@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Artamonov Valery Dmitrievich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.98.042; 621.923
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-633-634

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДЕТАЛИ ПРИ ЗАЧИСТКЕ ЛЕПЕСТКОВЫМ КРУГОМ

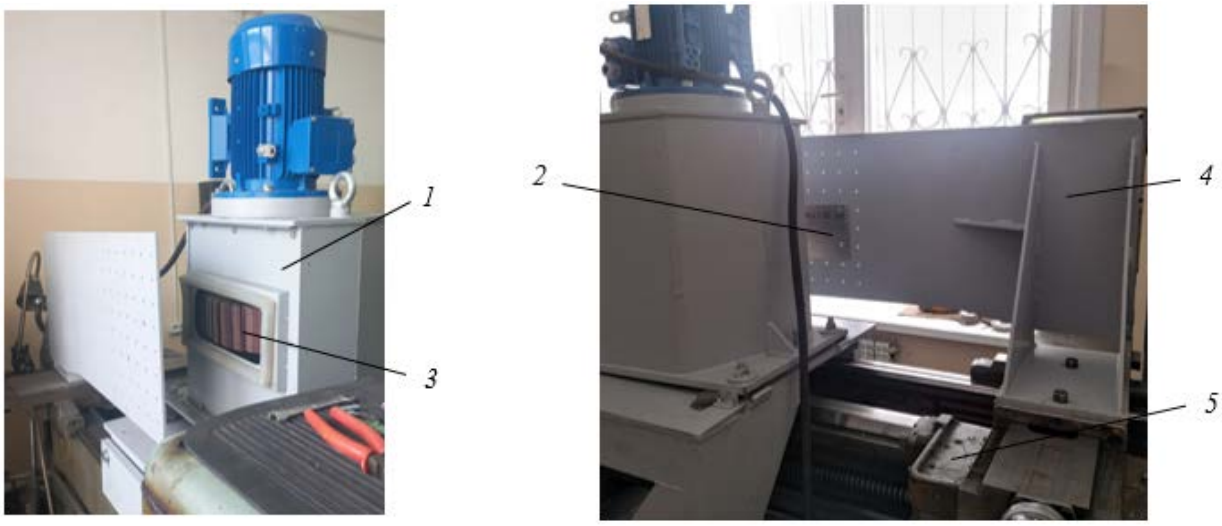
Ле Чи Винь, В.П. Кольцов, Д.А. Стародубцева, Е.В. Тардыбаева

По результатам измерения остаточных напряжений, сформированных в поверхностном слое обрабатываемого образца из алюминиевого сплава при попутном и встречном направлении продольной подачи заготовки при зачистке лепестковым кругом, построены графики зависимостей остаточных напряжений от режимов обработки. Максимальное значение величины остаточных напряжений не превышает 260 МПа, глубина залегания не превышает 30 мкм. Глубина залегания и величины остаточных напряжений при встречном и попутном направлении продольной подачи заготовки в условиях проведённого факторного эксперимента существенно не отличаются. Результаты экспериментального исследования позволяют прогнозировать картину изменения остаточных напряжений при реализации комплексной технологии формообразования крупногабаритных поверхностей панелей и обшивок.

Ключевые слова: зачистная установка, зачистка лепестковым кругом, остаточные напряжения, режимы обработки, исследовательский комплекс для измерения остаточных напряжений механическим методом.

Для изготовления крупногабаритных длинномерных панелей и обшивок крыла самолета в настоящее время активно применяется комплексная технология формообразования с помощью дробеударной обработки и последующей зачистки лепестковым кругом [1-20]. Для реализации этой

технологии совместно ФГБОУ ВО ИРНИТУ и ИАЗ - филиал ПАО «Яковлев» было спроектировано и изготовлено специальное оборудование – установка УДФ, состоящая из двух рабочих органов – дробеметного аппарата и зачистной головки. Процесс зачистки на данной установке осуществляется с помощью специального устройства – зачистной головки с абразивным лепестковым кругом. Главными движениями при зачистке являются движение продольной подачи вдоль обрабатываемой детали и вращение лепесткового круга. Вращение лепесткового круга при зачистке может осуществляться только в одном направлении, так как абразивные зерна приклеены с одной стороны лепестков, однако направление продольной подачи может быть встречным и попутным [4]. Встречным направлением подачи при зачистке является направление, при котором движение заготовки и вектор скорости резания лепесткового круга направлены в разные стороны, при попутном – движение заготовки совпадает с направлением вектора скорости резания. Характер взаимодействия лепесткового круга с обрабатываемой поверхностью при попутном и встречном направлении продольной подачи при зачистке заметно различается, что подтверждает и различные значения величины получаемой шероховатости в первом и во втором случае [4]. В связи с этим появилась необходимость комплексного исследования остаточных напряжений в поверхностном слое детали при попутном и встречном направлении продольной подачи при зачистке деталей из алюминиевого сплава в зависимости от вида и режимов зачистки.



а *б*

Рис. 1. Оборудование для комплексного исследования зачистки лепестковым кругом: 1 – зачистная установка; 2 – образец; 3 – абразивный лепестковый круг; 4 – кронштейн для закрепления образцов; 5 – токарно-винторезный станок 1К62

Исследование включало получение графических зависимостей характера распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали в зависимости от параметров режима зачистки, частоты вращения ле-

пестковогo круга, величины осадки лепестков в зоне контакта с обрабатываемой поверхностью детали и подачи заготовки при попутном и встречном процессе зачистки.

Методы исследования. Комплексные исследования шероховатости поверхности образца при попутной и встречной зачистке лепестковым кругом проведены на спроектированной и изготовленной в ИРНИТУ зачистной установке ЛЗГ-1 (рис. 1). Данная установка разработана на базе токарно-винторезного станка 1К62, что позволило использовать механизмы подачи станка для регулирования величины осадки и подачи при исследованиях.

Образцы для экспериментального исследования были изготовлены в виде пластин из алюминиевого сплава В95Т1 (с исходной шероховатостью *Ra*=0.465 мкм), габаритными размерами 150×150 мм. При обработке образец 2 закреплялся на кронштейне 4, установленном на суппорте токарно-винторезного станка 1К62 (рис. 1). Благодаря тому, что образец установлен на суппорте, продольная подача заготовки в процессе зачистки осуществляется продольной подачей станка. Величину осадки лепестков устанавливали до начала обработки с помощью маховика механизма поперечной подачи суппорта. Зачистная установка 1 была надежно закреплена 2-мя прихватами с болтами на направляющих токарно-винторезного станка 4. Таким образом, вибрация зачистной установки при работе практически исключалась.

Для измерения шероховатости поверхности образцов, *Ra* использовали профилометр контактного типа Taylor Hobson Form Talysurf i200.

Зачистку проводили лепестковым кругом 2 (рис. 1), диаметром 350 мм, шириной 100 мм. Материал абразивного зерна – электрокорунд (25А), основа лепестков – ткань средней жесткости, зернистость – Р60.

Комплексные исследования шероховатости поверхности образцов проведены методом полного факторного эксперимента типа 2^3 [21].

Режимы зачистки лепестковым кругом (факторный эксперимент типа 2^3)

Режим зачистки	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение
Частота вращения лепесткового круга, об/мин	600	800	1000
Подача продольная (попутная и встречная*), мм/мин)	575	780	985
Осадки лепестков, мм	2	4,5	7

* – При попутном направлении продольной подачи при зачистке движение заготовки и движение лепестков вращающегося лепесткового круга в зоне контакте происходит в одном направлении.
– При встречном направлении продольной подачи при зачистке движение заготовки направлено против движения лепестков вращающегося лепесткового круга.

В таблице представлены параметры режима зачистки для факторного эксперимента типа 2^3.

После зачистки лепестковым кругом образцы были переданы на подготовку и проведение измерений остаточных напряжений механическим методом (травление) на исследовательском комплексе УДИОН-2 (рис. 2).

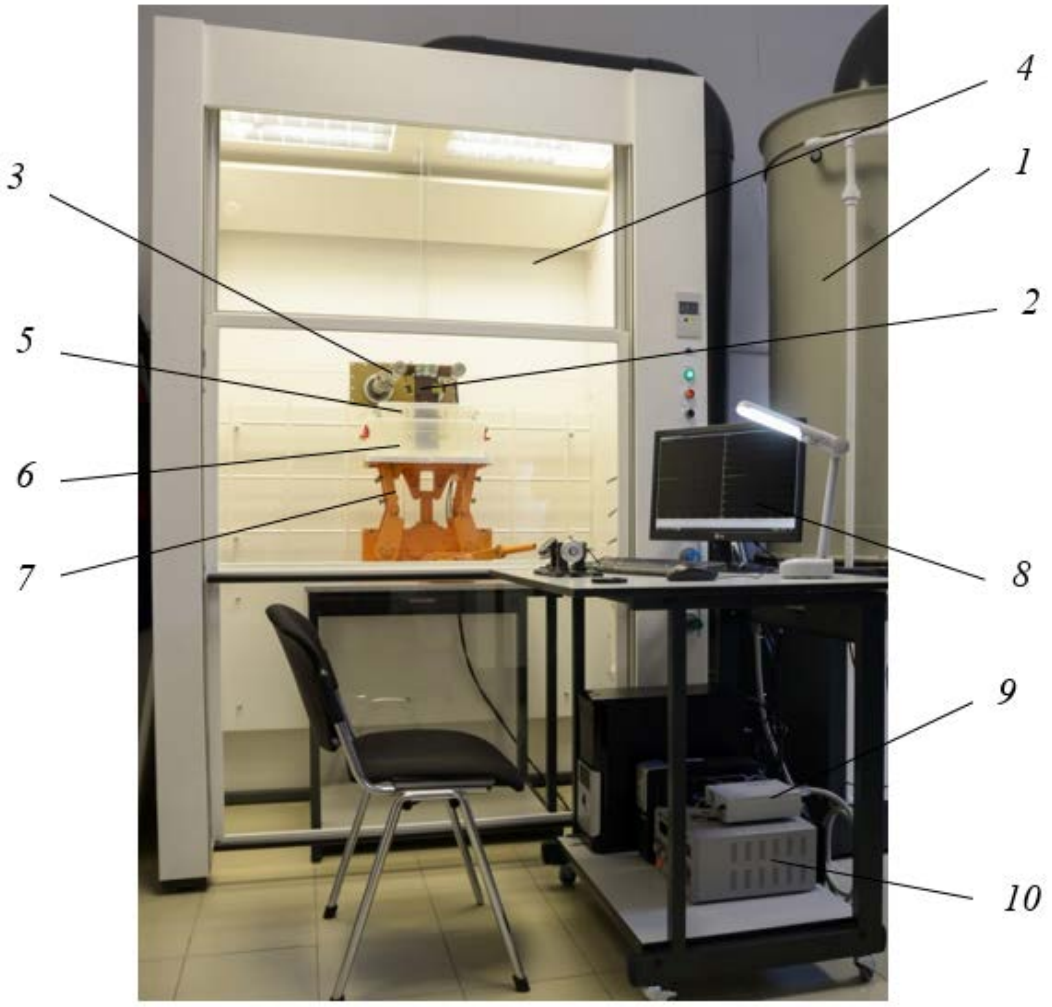
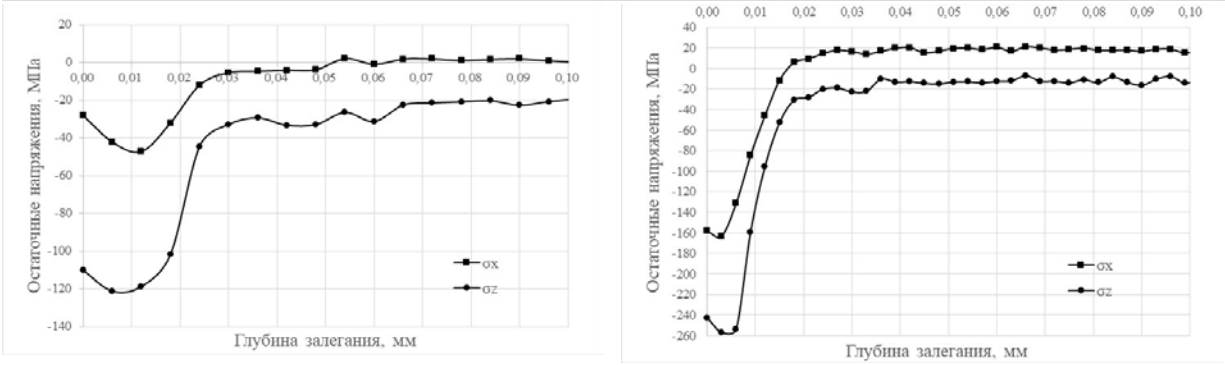


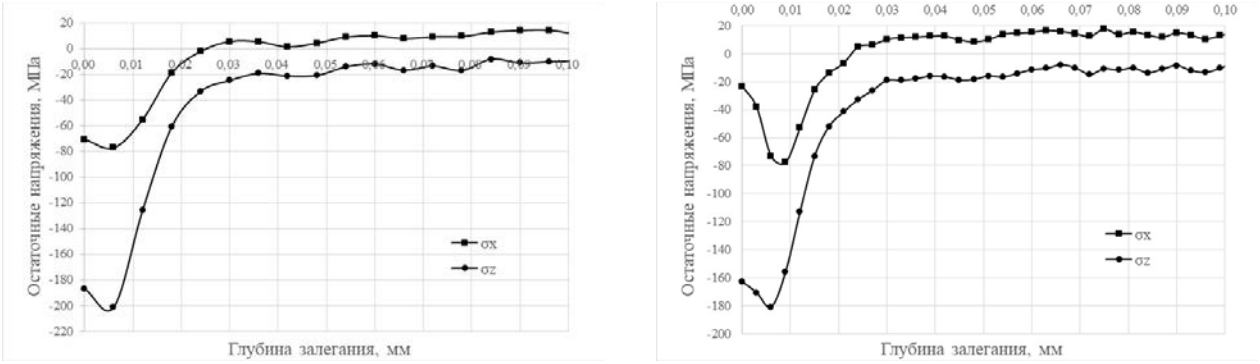
Рис. 2. Исследовательский комплекс УДИОН-2 для измерения Остаточных напряжений механическим методом: 1 – скруббер; 2 – приспособление для закрепления образцов; 3– кронштейны для приспособлений; 4 – вытяжной шкаф; 5 ***– травильная ванна; 6 – термостатирующая ванна; 7 – устройство подъема ванн; 8 – персональный компьютер; 9 – тензометрические модули системы сбора данных; 10 – блок питания***

Остаточные напряжения при попутном и встречном направлении продольной подачи при зачистке лепестковым кругом. На рис. 3 представлены результаты измерения остаточных напряжений, полученных после зачистки образцов лепестковым кругом при частоте вращения лепесткового круга 600 об/мин, продольной подаче заготовки (встречное и попутное направление) 575 мм/мин и максимальной осадке лепестков 7 мм.



а *Б*

Рис. 3. График распределения остаточных напряжений по глубине залегания при зачистке лепестковым кругом в зависимости от режима зачистки (частота вращения лепесткового круга 600 об/мин, продольная подача заготовки 575 мм/мин, максимальная осадка лепестков 7 мм), где а – встречное направлении подачи; б – попутное направлении подачи



а *Б*

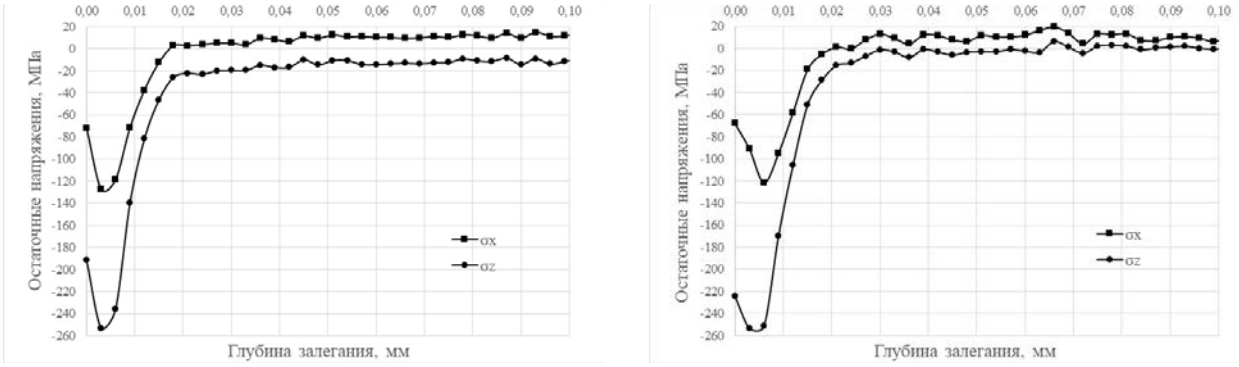
Рис. 4. График распределения остаточных напряжений по глубине залегания при зачистке лепестковым кругом в зависимости от режима зачистки (частота вращения лепесткового круга 1000 об/мин, продольная подача заготовки 575 мм/мин, максимальная осадка лепестков 7 мм), где а – встречное направлении подачи; б – попутное направлении подачи

Анализ представленных на рис. 3 графических зависимостей позволяет заявить, что при зачистке, при минимальном значении частоты вращения лепесткового круга и минимальном значении продольной подачи заготовки, независимо от направления подачи, картина распределения остаточных напряжений по глубине залегания имеет аналогичную форму, при этом толщина слоя сжимающих остаточных напряжениями (с отрицательным знаком) лежит в пределах 30-50 мкм. При этом, максимальное значение сжимающих остаточных напряжений при встречном направлении продольной подачи находится на глубине 10 мкм, при попутном на глубине всего 5 мкм. Однако, величина этих значений при встречной зачистке (48 МПа по оси *ox* и 122 МПа по оси *oz*) гораздо меньше, чем при попутной зачистке (165 МПа по оси *ox* и 260 МПа по *oz*).

На рис. 4 представлены результаты измерения остаточных напряжений, при увеличении частоты вращения лепесткового круга до 1000 об/мин.

Исходя из представленных на рис. 4 данных следует то, что при увеличении частоты вращения лепесткового круга до 1000 об/мин, характер изменения остаточных напряжений по глубине залегания в поверхностном слое заготовки не изменился. Кроме того, независимо от направления продольной подачи заготовки, толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями и максимальное значения сжимающих остаточных напряжений имеют практически одинаковые значения (80 МПа по оси *ox* и 185-202 МПа по оси *oz*) при глубине залегания порядка 5 мкм.

На рис. 5 представлены результаты измерения остаточных напряжений, полученных при увеличении продольной подачи заготовки в 1,5 раза (до 985 мм/мин), (при встречном и попутном направлении), минимальной скорости вращения лепесткового круга 600 об/мин, величине осадки лепестков 7 мм.

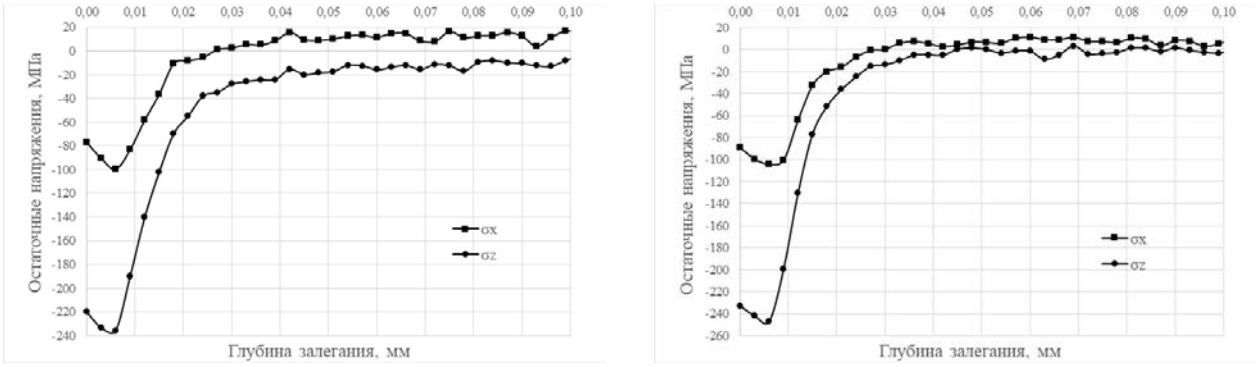


а ***Б***

Рис. 5. График распределения остаточных напряжений по глубине залегания при зачистке лепестковым кругом в зависимости от режима зачистки (частота вращения лепесткового круга 600 об/мин, продольная подача заготовки 985 мм/мин, максимальная осадка лепестков 7 мм), где а – встречное направлении подачи; б – попутное направлении подачи

По данным графиков, представленных на рис. 5 можно установить следующее. При минимальном значении частоты вращения лепесткового круга, установленном для данного факторного эксперимента 600 об/мин, максимальной подаче заголовки 985 мм/мин, осадке лепестков 7 мм, характер распределения остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое при попутном и встречном направлении при зачистке, а также глубина залегания максимальных остаточных напряжений и максимальные значения в соответствующем направлении по осям практически не отличаются. Установлено, что максимальное значения остаточных напряжений, определенное по данному режиму, 255 МПа, превышает ранее полученные значения (рис. 3, 4).

На рис. 6 представлены результаты измерения остаточных напряжений, полученных после зачистки образцов лепестковым кругом при частоте вращения лепесткового круга 600 об/мин, продольной подаче заготовки (встречное и попутное направление) 575 мм/мин и максимальной величине осадке лепестков 7 мм.



а ***б***

Рис. 6. График распределения остаточных напряжений по глубине залегания при зачистке лепестковым кругом в зависимости от режима зачистки (частота вращения лепесткового круга 1000 об/мин, продольная подача заготовки 985 мм/мин, максимальная осадка лепестков 7 мм), где а – встречное направлении подачи; б – попутное направлении подачи

По данным, представленным на рис. 6, можно сделать вывод о том, что несмотря на высокие параметры режима зачистки, установленные в данном факторном эксперименте (максимальное значение частоты вращения лепесткового круга, продольной подачи заготовки и осадки лепестков) форма изменения остаточных напряжений по глубине залегания в заготовке типична для всех ранее представленных экспериментов (рис. 3-6). Толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями, а также глубина залегания максимальных остаточных напряжений сохраняется как при встречном, так и при попутном направлении продольной подачи при зачистке. Кроме того, заметно, что при данном режиме максимальные значения остаточных напряжений несколько меньше по сравнению со значениями, полученными при более низкой частоте вращения лепесткового круга (см. рис. 5).

Выводы. При зачистке алюминиевого сплава цилиндрическим абразивным лепестковым кругом в поверхностном слое детали образуется слой сжимающих остаточных напряжений. Упрочненный слой при этом имеет малую глубину залегания, 20-50 мкм, не зависимо от направления продольной подачи лепесткового круга и режима зачистки.

Максимальные значения остаточных напряжений, полученных в ходе факторного эксперимента при заданных режимах зачистки, не превышают 260 МПа, даже при режиме зачистки с максимальным значением частоты вращения лепесткового круга, продольной подачи заготовки и

осадки лепестков. Глубина залегания максимальных остаточных напряжений во всех случаях составляет не более 10 мкм.

Направление продольной подачи заготовки практически не влияет на величину и характер формирования остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали. Отличие заметно только при зачистке при минимальном значении частоты вращения лепесткового круга и подачи заготовки.

Список литературы

1. Пашков А.Е. Об особенностях применения Отечественной и зарубежной технологии формообразования обшивок и панелей самолетов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5(100). С. 17-22.

2. Пашков А.Е., Шматков В.С. Особенности технологии дробеударного упрочнения крупногабаритных деталей самолетов // Управление технологическими процессами машиностроительного производства. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 1998. – С. 62-66.

3. Гребенников Д.С., Максименков В.И. Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 1. С. 116-121. DOI 10.25987/VSTU.2019.15.1.018.

4. Патент № 2759165 C1 Российская Федерация, МПК B24B 1/00, B24D 13/02. Способ обработки радиальным лепестковым кругом поверхности детали из алюминиевого сплава В95 : № 2020118529 : заявл. 05.06.2020 : опубл. 09.11.2021 / В. П. Кольцов, Д. А. Стародубцева, Ч. В. Ле [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Публичное акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Иркут».

5. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Пискунова Ю.Ю. Лабораторный комплекс для исследования зачистки лепестковым кругом / Ле Чи Винь, В.П. Кольцов, Д.А. Стародубцева, Ю.Ю. Пискунова // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) : Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции, Иркутск, 13–14 мая 2024 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2024. – С. 77-83.

6. Koltsov V., Starodubtseva D., Le Tri Vinh, Phung Xuan Son. Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels // Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference (Irkutsk, 21–26 May 2018). Irkutsk, 2018. Vol. 158. P. 386–390. http://dx.doi.org/10.2991/avent- 18.2018.75.

7. Дубровский П.В. Исследование процессов полирования авиационных деталей // Системы управления жизненным циклом изделий авиа-

ционной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: тезисы докладов V Междунар. науч.-практ. конф. (г. Ульяновск, 24–25 ноября 2016 г.). Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2016. С. 141–142.

8. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2005. 138 с.

9. Димов Ю.В. Перспективы использования лепестковых кругов при изготовлении деталей самолета // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении: сб. науч. тр. / под ред. Ю.В. Димова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 3–10.

10. Стародубцева Д.А. Револьверная головка для зачистки панелей и обшивок лепестковыми кругами после дробеударного формообразования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4. С. 34–37.

11. Пат. № 2567926, Российская Федерация, B24B 29/00 (2006.01), B24B 41/04 (2006.01). Револьверная головка для шлифования криволинейных поверхностей лепестковыми кругами / А.К. Китов, А.Е. Пашков, П.Г. Гришаев, Д.А. Стародубцева; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут». Заявл. 27.12.2013; опубл. 10.11.2015. Бюл. № 31.

12. Кальченко В.И., Кальченко В.В., Кологойда А.В., Кириенко С.Ю. Шлифование криволинейных поверхностей лопаток газотурбинных двигателей абразивной лентой при помощи робота с ЧПУ РМ-01 //Вестник двигателестроения. 2012. № 1. С. 181–185.

13. Воскобойников Б.С., Гречиков М.М., Гуськова Г.И. Шлифовальные технологии и высокоточное оборудование // Комплект: инструмент, технология, оборудование. 2008. № 1. С. 12–30.

14. Рыкунов Н.С., Сухов Е.И., Волков Д.И. Высокопроизводительная обработка материалов методом глубинного шлифования // Оптимизация операций механической обработки: межвуз. сб. науч. тр. / подред. С.С. Силина. Ярославль: Изд-во ЯПИ, 1984. С. 23–32.

15. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Фунг Суан Шон. Производительность зачистки поверхности лепестковым кругом после дробеударного формообразования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 5. С. 874–883. http://dx.doi.org/10.21285/1814- 3520-2019-5-874-883

16. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Ракицкая В.Б., Стародубцева Д.А. Выбор ширины цилиндрического лепесткового круга для револьверной головки при зачистке крупногабаритных обводообразующих деталей // Вестник ИрГТУ. 2020; 24(2). С.75-283.

17. Simulation of thermal strength of the process of flat grinding of workpieces in intermittent circles / N. Vetkasov, S. Ulitin, O. Krupennikov [et al.] // MATEC web of conferences : The proceedings International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical

Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019), Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 298. – Sevastopol: EDP Sciences, 2019. – P. 00022. – DOI 10.1051/matecconf/201929800022.

18. Surface quality formation at polymer composite details' abrasive processing / M. Tamarkin, E. Tishchenko, A. Azarova, V. Butenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, 22–27 мая 2020 года. Vol. 918. – Novosibirsk, 2020. – P. 012114. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012114.

19. Improving the Efficiency of Fuel Combustion with the Use of Various Designs of Embrasures / R. V. Fedorov, D. A. Generalov, V. V. Sherkunov [et al.] // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 11. – P. 4452. – DOI 10.3390/en16114452.

20. Sapunov, V. The study of the health of grinding wheels on a bakelite bunch, heat-treated in a microwave field / V. Sapunov, N. Vetkasov, L. Khudobin // Materials Today: Proceedings : 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Elsevier Ltd: Elsevier Ltd, 2021. – P. 1711-1713. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.231.

21. Адлер Ю.Р. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.Р. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Машиностроение, 1976. – 279 с.

Ле Чи Винь, канд. техн. наук, доцент, vinh_istu@mail.ru, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Кольцов Владимир Петрович, д-р техн. наук, профессор, kolcov@ex.istu.edu, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Стародубцева Дарья Александровна, канд. техн. наук, доцент, starodybseva@ex.istu.edu, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Тардыбаева Евгения Васильевна, канд. филол. наук, доцент, zheniakhanhsinh@mail.ru, Россия, Иркутск, Байкальский государственный университет

EXPERIMENTAL STUDY OF RESIDUAL STRESSES IN THE SURFACE LAYER OF THE PART WHEN GRINDING WITH A FLAP WHEEL

Le Tri Vinh, V.P. Koltsov, D.A. Starodubtseva, E.V. Tardybaeva

Based on the results of measuring the residual stresses formed in the surface layer of the processed aluminum alloy sample in the passing and opposite direction of the longitudinal feed of the workpiece during grinding with a flap wheel, graphs of the dependence of residual stresses on processing modes are constructed. The maximum value of the residual stresses does not exceed 260 MPa, the depth of occurrence does not exceed 30 microns. The depth of occurrence and the magnitude of residual stresses in the opposite and passing direction of the longitudinal feed of the workpiece under the conditions of the conducted factorial experiment do not differ significantly. The results of the experimental study make it possible to predict the

pattern of changes in residual stresses during the implementation of an integrated technology for shaping large-sized surfaces of panels and cladding.

Key words: grinding plant, grinding with a flap wheel, residual stresses, processing modes, research complex for measuring residual stresses by mechanical method

Le Tri Vinh, candidate of technical sciences, docent, vinh_istu@mail.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University,

Koltsov Vladimir Petrovich, doctor of technical sciences, professor, kolcov@ex.istu.edu, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University,

Starodubtseva Darya Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent, starodybseva@ex.istu.edu, Russia, Irkutsk, Irkutsk National,

Tardybaeva Evgenia Vasilevna, candidate of philological sciences, docent, zheniakhanhsinh@mail.ru, Russia, Irkutsk, Baikal State University

УДК 621
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-643-644

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ В РАДИАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ

И.А. Донюков, Е.А. Агеева

В статье рассмотрена методика расчета процесса нагрева цилиндрических тел в радиационных установках кольцевого типа с неохлаждаемыми рефлекторами. В качестве основной была рассмотрена задача определения результирующих потоков на нагреваемое тело и рефлектор в системе из трех тел (излучатели, нагреваемое тело, рефлектор). Указанная задача решена для случая, когда расстояние между нагреваемым телом и излучателями значительно меньше, чем длина установки и тела. Предлагаемая методика расчета позволяет определять температуру в любом месте сечения нагреваемого тела в заданный момент времени, что позволяет оценить перепад температур по сечению, что крайне важно для расчета нагрева толстостенных муфт. Полученные результаты могут быть положены в основу методики расчета средней температуры муфты, а также распределения температуры по толще рефлектора для любого момента процесса нагрева.

Ключевые слова: материал с эффектом памяти формы, ферменная конструкция, радиационная нагревательная установка.

В настоящее время для монтажа ферменных конструкция в космосе широкое распространение получило использование материалов с эффектом памяти формы (МЭПФ). Эффект памяти формы был открыт Г.В. Курдюмовым и его сотрудниками в конце 30-х годов прошлого века. Материалу при температуре, выше температуры мартенситных превращений, придается определенная форма. Затем он охлаждается до температур, при которых происходит протекание этих превращений и пластически деформи-

руется в пределах 12 – 15%. После нагрева до температуры, выше обратного мартенситного превращения, материал восстанавливает свою первоначальную форму. Существует целый класс МЭПФ, отличающихся температурой срабатывания (температура конца обратного мартенситного превращения), диапазоном температур начала и конца мартенситных превращений и степенью реализуемой деформации [1-3].

В настоящее время в промышленности, в основном, нашли применение только МЭПФ, имеющие отрицательные температуры срабатывания. Они применяются главным образом для соединения трубопроводов. Технологический процесс выполняют следующим образом: 1) механической обработкой муфте придают конфигурацию, которую она должна иметь после срабатывания; 2) затем ее опускают в жидкий азот и дорнуют, увеличивая ее внутренний диаметр, чтобы она могла быть свободно надета на обжимаемые трубы; 3) в процессе постановки муфту вынимают из ванны с жидким азотом и в строго ограниченное время (20 сек) одевают на соединяемые элементы. Под воздействием тепла от окружающей среды муфта плотно обжимает соединяемые элементы. В качестве материала муфты используется сплав ТН-IK (нитинол с криогенными температурами фазовых превращений).

В условиях космоса работать с жидким азотом не представляется возможным, поэтому использовать МЭПФ с отрицательными температурами срабатывания нельзя.

В настоящее время имеется опыт использования МЭПФ с высокой температурой срабатывания для привода механизмов, установленных на КА. Такие МЭПФ, так же, как и с отрицательными температурами, способны развивать высокие напряжения (500 – 700 МПа) и степени возврата формы (до 8,5%). Поэтому для соединения в космосе стержней ферм представляется целесообразным использовать МЭПФ с температурой срабатывания выше +80°С.

Учитывая, что в условиях космоса нагрев муфт, как правило, осуществляется с помощью радиационных установок кольцевого типа с неохлаждаемыми рефлекторами представляется целесообразным разработка методики их расчета, учитывающей собственное излучение нагретого до высокой температуры рефлектора.

Методика расчета процесса нагрева цилиндрических тел в радиационных установках кольцевого типа с неохлаждаемыми рефлекторами. Особенностью установки, определяющей специфику метода расчета, является использование в качестве рефлектора материала, обладающего высокими отражающими свойствами, высокой степенью черноты, высокой температурной стойкостью и низкой теплопроводностью.

В первые секунды нагрева отражающий слой рефлектора нагрева до высокой температуры и создает дополнительный лучистый поток на нагреваемое тело. Температура рефлектора достигает 500 - 700°С и принимается постоянной для всего процесса нагрева.

Схема радиационной установки приведена на рис. 1. Оси кварцевых ламп 1, поверхность нагреваемого тела 2 и рефлектор 3 располагаются по концентрическим окружностям.

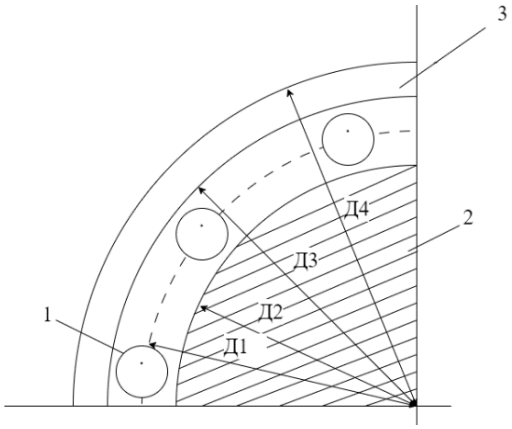


Рис. 1. Схема радиационной установки: 1 – кварцевые дампы, 2 – нагреваемое тело, 3 – рефлектор

Основной задачей является определение результирующих потоков на нагреваемое тело и рефлектор в системе из трех тел (излучатели, нагреваемое тело, рефлектор).

Расчетная схема нагрева приведена на рис. 2. Размеры сечений нитей ламп приняты исчезающе малыми по сравнению с размерами сечений рефлектора и нагреваемого тела, а кварцевые колбы приняты практически прозрачными для лучистых потоков (коэффициент поглощения стекла колбы составляет примерно 0,04). Это позволяет при расчете пренебречь лучистыми потоками от нагреваемого тела 2 и рефлектора 3 на лампы 1.

Задача решается для случая, когда расстояние $\frac{Д_2-Д_1}{2}$ между нагреваемым телом и излучателями значительно меньше, чем длина установки и тела (более чем в 4 раза). В этом случае систему из трех тел можно считать замкнутой и плоской.

Расчет выполняется для нагреваемого тела и ламп единичной длины.

Поверхности тел 2 и 3 считаются диффузными.

Нагреваемое тело 2 считается теплофизически тонким телом.

Для этих условий результирующие потоки для нагреваемого тела 2 и рефлектора 3 определяются выражениями [4,5]:

$$Q_{\text{рез.2}} = nQ_{Л}\text{А}_2\frac{\varphi_{12}+\varphi_{13}\frac{R_3'\cdot\varphi_{32}}{1-\varphi_{33}\cdot R_3'}}{1-R_2'\frac{R_3'\cdot\varphi_{32}}{1-\varphi_{33}\cdot R_3'}}+\frac{\sigma_0(T_2^4-T_3^4)\pi Д_2}{\frac{1}{\text{А}_2}+\frac{Д_2}{Д_3}(\frac{1}{\text{А}_3}-1)},\ \frac{\text{Вт}}{\text{М}} \qquad (2)$$

где φ_{12}, φ_{13}, φ_{32} и φ_{33} - угловые коэффициенты; А_2 и А_3 - соответственно, коэффициенты поглощения нагреваемого тела и рефлектора; R_2' и R_3' - соответственно, коэффициенты отражения нагреваемого тела и рефлектора; Т_2 и Т_3 - соответственно, температуры нагреваемого тела и рефлектора; $Д_2$ и $Д_3$ - соответственно, диаметры нагреваемого тела и рефлектора; n

- количество ламп; $Q_Л$ - мощность лампы с единицы длины; σ_c − постоянная Стефана-Больцмана.

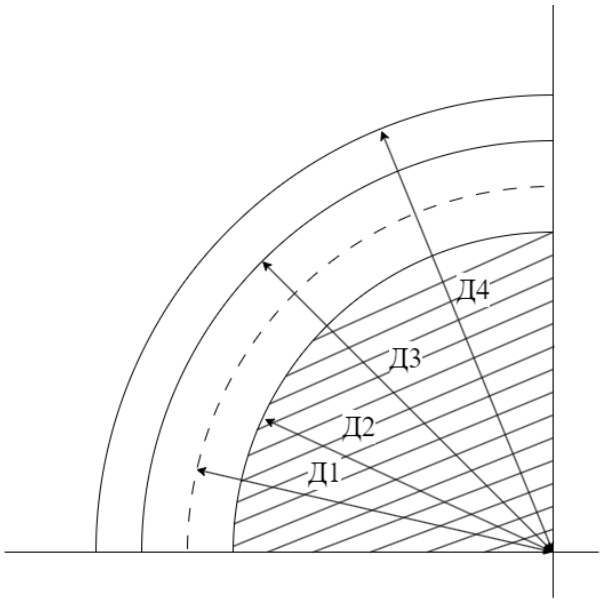


Рис. 2. Расчетная схема нагрева

Для рефлектора 3:

$$Q_{\text{рез.3}} = nQ_Л A_3 \frac{\frac{\varphi_{13}+\varphi_{12}R_2'}{1-R_3'\varphi_{33}}}{1-R_2'\frac{R_3'\cdot\varphi_{32}}{1-\varphi_{33}\cdot R_3'}} - \frac{\sigma_0(T_2^4-T_3^4)\pi Д_2}{\frac{1}{A_2}+\frac{Д_2}{Д_3}(\frac{1}{A_3}-1)}, \frac{\text{Вт}}{\text{М}} \quad (3)$$

В формулы (1), (2) входят величины угловых коэффициентов φ_{12}, φ_{13}, φ_{32} и φ_{33}.

Величина коэффициента φ_{12}может быть определена из формулы, которая понятна из рассмотрения рис. 3:

$$\varphi_{12} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{arcsin\frac{Д_2}{Д_1}}{\pi} \quad (4)$$

Коэффициент φ_{13}определяется из соотношения:

$$\varphi_{13} = 1 - \varphi_{12} \quad (5)$$

Т3 не должна превышать термостойкость материала рефлектора

Угловой коэффициент φ_{32} находят по известной формуле:

$$\varphi_{32} = \frac{F_2}{F_3} = \frac{Д_2}{Д_3} \quad (6)$$

Наконец, угловой коэффициент φ_{33} связан с φ_{32} соотношением:

$$\varphi_{32} = 1 - \varphi_{33} \quad (7)$$

Полученную формулу (1) подставляют в выражения для определения температуры, полученные в работе [6-8] для цилиндрических трубчатых тел или в [9, 10] для массивных прутков.

$$\text{Т} = \text{Т}_0 + \frac{Q_{\text{рез.2}}}{2\pi\lambda L}\Theta, \text{К} \quad (8)$$

где Т - искомая температура в определенный момент времени, К; Т_0 - начальная температура, К; λ - коэффициент теплопроводности нагреваемо-

го тела, Вт/м.град; L - длина источника излучения, М; Θ - выражение для безразмерной температуры.

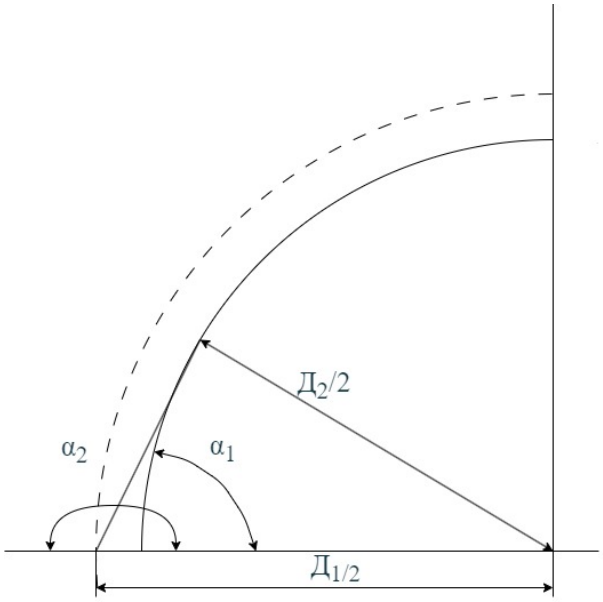


Рис. 3. Схема определения коэффициента φ_{12}

Данная методика расчета позволяет определять температуру в любом месте сечения нагреваемого тела в заданный момент времени. Это дает возможность оценить перепад температур по сечению, что крайне важно для расчета нагрева толстостенных муфт. Перепад температур не должен превышать 50°С.

Кроме того, полученное выражение для результирующего потока рефлектора позволяет рассчитывать тепловое сопротивление слоя теплоизоляции с тем, чтобы обеспечить требуемые температуры на отражающей и тыльной поверхностях. При этом тепловой поток через рефлектор $Q_{\text{р}}$ приравнивается к $Q_{\text{рез.3}}$. Для условий космоса $Q_{\text{р}}$ определяется, как:

$$Q_{\text{р}} = \frac{2\pi\lambda_2(\text{Т}_3-\text{Т}_4)}{\frac{1}{\text{В}i_2+ln\frac{\text{Д}_4}{\text{Д}_3}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{М}} \qquad (9)$$

где: Т_4 - температура тыльной стороны рефлектора, °С; Д_4 - диаметр тыльной стороны рефлектора, м; $\text{В}i_2$ - число Био для тыльной стороны рефлектора.

Результаты:

1. Полученные выражения для результирующих потоков в кольцевых радиационных установках учитывают собственное излучение нагретого рефлектора, что позволяет производить расчет процесса нагрева муфт из МЭПФ в условиях космоса.

2. Расчеты, проведенные по вышеизложенной методике, показывают, что перепад температур по толщине муфты при нагреве в установках космического назначения, не превышает 30 – 35°С, что дает основание в последующих расчетах принимать муфты теплотехнически тонкими тела-

ми. Это создает возможность разработки методики расчета средней температуры муфты, а также распределения температуры по толще рефлектора для любого момента процесса нагрева.

Список литературы

1. Привод из материала с эффектом памяти формы для трансформируемых космических конструкций / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, В. С. Филиппов, А. О. Шахвердов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 1. С. 73-80. DOI 10.31772/2712-8970-2022-23-1-73-80. EDN OUCZJI.

2. Москалева Ю.А. Применение материалов с эффектом памяти формы / Ю. А. Москалева, В. В. Корчагин // II научно-педагогические чтения молодых ученых имени профессора С. В. Познышева : сборник материалов межведомственной научно-практической конференции курсантов и студентов. Воронеж: Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний России, 2022. С. 79-83. EDN EJBHVI.

3. Оценка деформационно-силовых характеристик привода из материала с эффектом памяти формы для трансформируемых космических конструкций / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, В. С. Филиппов, А. О. Шахвердов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 109-115. DOI 10.31772/2712-8970-2023-24-1-109-115. EDN UNXTZQ.

4. Привод из материала с эффектом памяти формы для раскрытия трансформируемой космической конструкции / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, Г. Н. Кувыркин, А. О. Шахвердов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 4(348). С. 97-102. DOI 10.33979/2073-7408-2021-348-4-97-102. EDN XYDEXI.

5. Кувыркин Г.Н. Тепловой режим привода из материала с эффектом памяти формы / Г. Н. Кувыркин, И. Ю. Савельева, А. О. Шахвердов // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену: Материалы конференции. Том 2. Москва: Национальный исследовательский университет "МЭИ", 2022. С. 225-227. EDN OLUOUC.

6. Насирова Н.Н. Изучение и использование материалов с эффектом памяти формы / Н. Н. Насирова, С. А. Арефьева // Модернизация, инновации, прогресс: передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации MIP: ENGINEERING-IV-2022: сборник научных статей по материалам IV Международной научной конференции. Красноярск: Общественное учреждение "Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений", 2022. С. 18-24. DOI 10.47813/mip.4.2022.4.18-24. EDN XIPUFB.

7. Уханов И.Г. Исследование динамики упругих элементов конструкции космических аппаратов с системой раскрытия и зачековки на основе материала с эффектом памяти формы / И. Г. Уханов, Г. А. Матвеев, Я. А. Галкин // Авиакосмическое приборостроение. 2024. № 10. С. 28-35. DOI 10.25791/aviakosmos.10.2024.1436. EDN GFPTPQ.

8. Расчет раскрытия трансформируемой космической конструкции с приводом из материала с эффектом памяти формы / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, Г. Н. Кувыркин, А. О. Шахведов // Материалы XXIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2023) : Материалы конференции. Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2023. С. 576-578. EDN DIXOJA.

9. Атлы В.С. Материалы с эффектом памяти // XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика: Материалы докладов семинара / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. С. 156-158. EDN JLRANG.

10. Современные материалы с памятью формы / Е. В. Петроченко, О. С. Молочкова, И. А. Деева, А. Л. Соколова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2023. Т. 14, № 1. С. 16-18. EDN ASBQUD.

Донюков Игорь Александрович, канд. техн. наук, доцент, mai@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Агеева Елена Анатольевна, старший преподаватель, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

CALCULATION OF THE HEATING PROCESS OF CYLINDRICAL BODIES IN RADIATION INSTALLATIONS

I.A. Donukov, E.A. Ageeva

The article considers the calculation method of the heating process of cylindrical bodies in ring-type radiation installations with uncooled reflectors. The main problem was to determine the resulting flows to the heated body and reflector in a system of three bodies (emitters, heated body, reflector). This problem was solved for the case when the distance between the heated body and the emitters is significantly less than the length of the installation and the body. The proposed calculation method allows determining the temperature at any point in the cross-section of the heated body at a given time, which allows estimating the temperature difference across the cross-section, which is extremely important for calculating the heating of thick-walled couplings. The obtained results can be used as a basis for calculating the average temperature of the coupling, as well as the temperature distribution across the reflector thickness for any moment of the heating process.

Key words: shape memory material, truss structure, radiation heating unit.

Donyukov Igor Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, mai@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Ageeva Elena Anatolyevna, Senior Lecturer, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-650-651

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ТУРИЗМА ПО РОССИИ

Р.И. Юсупова, Р.С. Зарипова

Стремительное развитие цифровых технологий позволяет эффективно использовать их в области туризма. Современные цифровые технологии играют ключевую роль в развитии туристической отрасли, обеспечивая быстрый доступ к информации. В связи с этим разработка интеллектуального мобильного приложения актуальна в условиях растущей популярности внутреннего туризма в России, где количество туристов постоянно увеличивается. В статье представлен процесс разработки интеллектуального мобильного приложения для туризма по России, призванного решить проблему информационного дефицита для туристов, путешествующих самостоятельно. Приложение использует технологии искусственного интеллекта для предоставления индивидуальных рекомендаций, учитывая предпочтения пользователей и актуальные данные о туристических объектах. Приложение поможет туристам получать актуальную информацию об объектах культурного и исторического наследия, а также об оптимальных туристических маршрутах, что, в свою очередь, повлияет на развитие внутреннего туризма в стране.

Ключевые слова: туризм, мобильное приложение, интеллектуальные технологии, искусственный интеллект, цифровизация, цифровая трансформация туризма, разработка программного обеспечения.

Введение. В данное время происходит стремительный прогресс цифровизации и глобализации туристической отрасли, вследствие этого возникает необходимость внедрения различных цифровых технологий для улучшения качества обслуживания и повышения привлекательности внутреннего туризма в России [1]. Потребность в путешествиях по родной стране растет с каждым годом, что связано с новыми социально-экономическими условиями и санкционными ограничениями. Это стимулирует развитие внутреннего туризма, делая его более востребованным.

Актуальность разработки туристического мобильного приложения объясняется тем, что туристы в путешествие чаще всего берут с собой телефон. По данным Statista рынок туристических приложений будет расти каждый год на 60%, что говорит о востребованности разработки и использования мобильных приложений для повышения эффективности взаимодействия с целевой аудиторией в туристической отрасли.

Несмотря на наблюдаемую динамику роста внутреннего туризма, сохраняется проблема информационного дефицита для туристов, путешествующих самостоятельно. Например, по результатам проведенного опроса среди туристов, известно, что 78% респондентов предпочитают индивидуальные поездки организованным турам и нуждаются в удобных инструментах для планирования своих поездок. Многие туристы, путешествуя индивидуально, сталкиваются с недостатком информации о туристических объектах, маршрутах, достопримечательностях, культурных мероприятиях и местах для отдыха, что негативно сказывается на впечатлении от путешествий. Для решения этих проблем было решено разработать интеллектуальное мобильное приложение, которое упростит процесс планирования путешествий по России. Данное приложение будет использовать технологии искусственного интеллекта для предоставления индивидуальных рекомендаций, основанных на предпочтениях пользователей, а также актуальных данных о туристических объектах. Это позволит не только повысить уровень удовлетворенности туристов, но и будет способствовать развитию внутреннего туризма в стране.

Объектом исследования являются туристы, нуждающиеся в удобных инструментах для планирования своих поездок.

Целью исследования является разработка туристического интеллектуального мобильного приложения, которое обеспечит доступ к актуальной информации о туристических объектах России, предоставляя пользователям персонализированные рекомендации на основе их предпочтений и текущих данных о достопримечательностях и доступных туристических услугах.

Задачи исследования включают в себя: анализ существующих туристических приложений и выявление их недостатков; разработка интеллектуальных алгоритмов для анализа предпочтений туристов и генерации персонализированных рекомендаций, создание мобильного приложения и его тестирование на целевой аудитории.

Новизна исследования заключается в реализации интеллектуальных алгоритмов, которые анализируют предпочтения пользователей и на их основе предлагают оптимальные маршруты и достопримечательности.

В рамках данного исследования было разработано и протестировано приложение, которое не только упростило процесс выбора маршрутов и достопримечательностей, но и создало платформу для взаимодействия между туристами и местными жителями, способствуя обмену опытом и культурным взаимодействиям.

Методы исследования. Для исследования применялись методы сравнительного анализа и синтеза, а также бенчмаркинга для оценки конкурентных преимуществ разрабатываемого продукта, анализ научной литературы и источников по теме исследования. Анкетный опрос туристов, статистические методы анализа использовались для изучения динамики развития туризма, а интеллект-карты и диаграмма Ганта помогли структурировать процесс разработки приложения.

Результаты исследования. В сфере туризма мобильные приложения классифицируются по принадлежности к бизнес-структурам. Приложения могут выполнять функцию бизнес-инструмента с поддержкой основной деятельности компании, тогда оно разрабатывается для конкретных туристических фирм. Альтернативной моделью являются автономные приложения, создаваемые независимыми разработчиками и ориентированные на прямую монетизацию за счет различных механизмов, например, встроенных покупок или подписки [2].

Несмотря на наличие мобильных версий веб-сайтов, специализированные приложения предоставляют ряд существенных преимуществ:

– функциональность и легкость использования [3], так как мобильное приложение может объединить все функции в одной информационной системе, что позволяет пользователям не тратить время на звонки и поиск информации;

– экономичность, так как приложение является эффективным и недорогим инструментом для продвижения бизнеса и взаимодействия с пользователями [4];

– осведомленность, так как через приложение можно легко сообщать пользователям необходимую информацию, а также рассказывать о различных акциях и бонусах;

– push-уведомления, которые позволяют отправлять сообщения пользователям, даже если они не находятся в приложении, что увеличивает их вовлеченность;

– привлечение новых клиентов, так как приложение повышает вероятность использования услуг компании по сравнению с традиционными методами рекламы, такими как сайты или баннеры;

– поддержание имиджа и повышение узнаваемости бренда, потому что наличие собственного приложения создает впечатление о компании как о более серьезной и престижной, что, в свою очередь, ведет к увеличению прибыли.

Для определения функциональных требований к разрабатываемому туристическому приложению и оценки его конкурентных преимуществ проведем сравнительный анализ существующих на рынке информационных систем в сфере туризма, результаты представлены в таблице 1.

Сравнительный анализ программных продуктов

Программный продукт	Описание	Основные функции	Рейтинг (Google Play/App Store)	Особенности
ИзиТрэвел	Приложение для бронирования туров и экскурсий по России	Бронирование туров, экскурсий, отелей, авиабилетов		Интерактивные карты, отзывы пользователей, персонализированные рекомендации
Яндекс. Путешествия	Приложение для планирования путешествий и бронирования билетов	Бронирование авиабилетов, отелей, аренда автомобилей, маршруты		Интеграция с Яндекс. Картами, персонализированные рекомендации, отзывы пользователей
Островок	Приложение для бронирования отелей и апартаментов	Бронирование отелей, апартаментов, хостелов		Скидки и акции, бонусная программа, отзывы пользователей

БлаБлаКар	Приложение для поиска попутчиков и совместных поездок	Поиск попутчиков, планирование поездок, отзывы пользователей		Удобный интерфейс, система рейтингов, уведомления о поездках
Авиасейлс	Приложение для поиска и бронирования авиабилетов	Поиск и бронирование авиабилетов, сравнение цен, уведомления о скидках		Удобный интерфейс, система рейтингов, уведомления о поездках

Сфера туризма стремительно развивается. Одним из набирающих популярность трендов является использование «умных технологий» в качестве помощников для туристов.

Данный анализ позволил выявить сильные и слабые стороны аналогов и определить оптимальный набор функций для нового приложения, оно должно содержать: бронирование билетов; поиск и фильтры; GPS, карта и построение оптимального маршрута к достопримечательностям; служба поддержки; демонстрация билета; путеводители и рекомендации с использованием искусственного интеллекта; отзывы и рейтинги; добавление фотографий.

Реализация приложения. Для данного туристического приложения был выбран нативный метод, поскольку он больше подходит для разработки в короткие сроки. В основе приложения лежит язык программирования Kotlin в сочетании с Jetpack Compose для построения современного и отзывчивого интерфейса. Этот подход обеспечивает декларативный способ создания UI, упрощая разработку и повышая ее скорость. Использование Android KTX дополнительно оптимизирует работу с Android API, делая код более простым и понятным. Разработка осуществлялась в среде Android Studio, предоставляющей мощный инструментарий для всех этапов создания приложения, от проектирования интерфейса до тестирования и отладки [5].

Серверная часть приложения построена с использованием Spring Framework, одного из ведущих фреймворков для разработки Java-приложений. Spring обеспечивает надежную основу для работы с веб-сервисами, RESTful API и другими необходимыми компонентами, обеспечивая эффективное взаимодействие мобильного приложения с сервером. В качестве фундаментальной библиотеки используется Java Standard Edition, предоставляющая обширный набор инструментов для работы с основными типами данных, сетевыми операциями и другими базовыми функциями [6]. Вся информация хранится и обрабатывается с помощью надежной базы данных [7].

Данный комплексный подход к разработке позволил создать функциональное и удобное туристическое приложение, отвечающее современным требованиям и готовое к дальнейшему развитию и масштабированию.

Запустив приложение, открывается экран авторизации с опциями входа для зарегистрированных пользователей и регистрации для новых (рис. 1) [8].

Приложение позволяет спланировать путешествие по России, предлагая на выбор различные города. Вкладки «Популярное», «Рекомендованное» и «Специальная подборка для вас» (основанная на истории ваших

поездок) помогут определиться с выбором (рис. 2). Можно построить маршрут, выбрать транспорт и забронировать отель прямо в приложении [9]. Для быстрого поиска города предусмотрен поисковый ввод. Интерфейс приложения прост и интуитивно понятен.

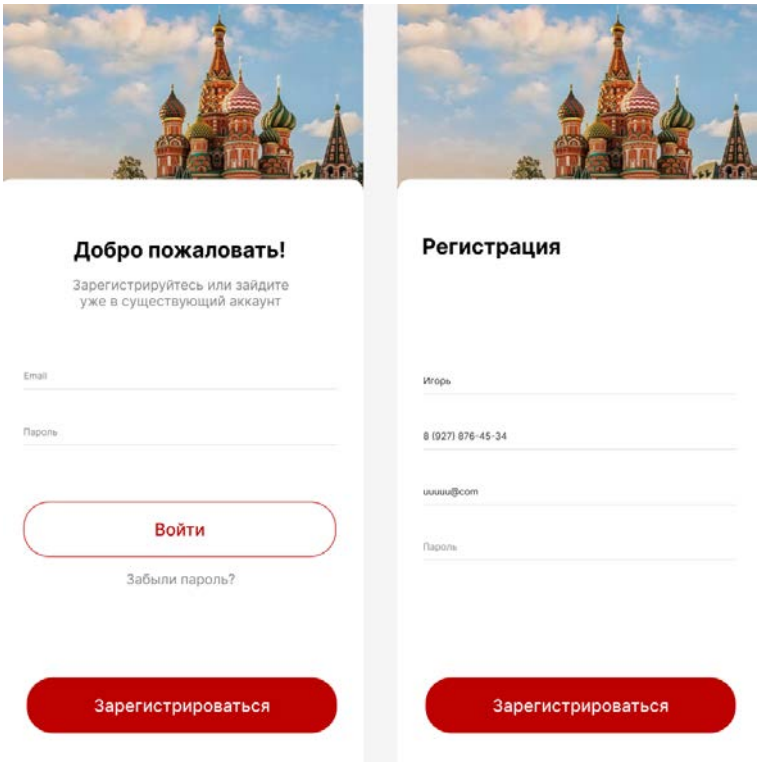


Рис. 1. Окно авторизации

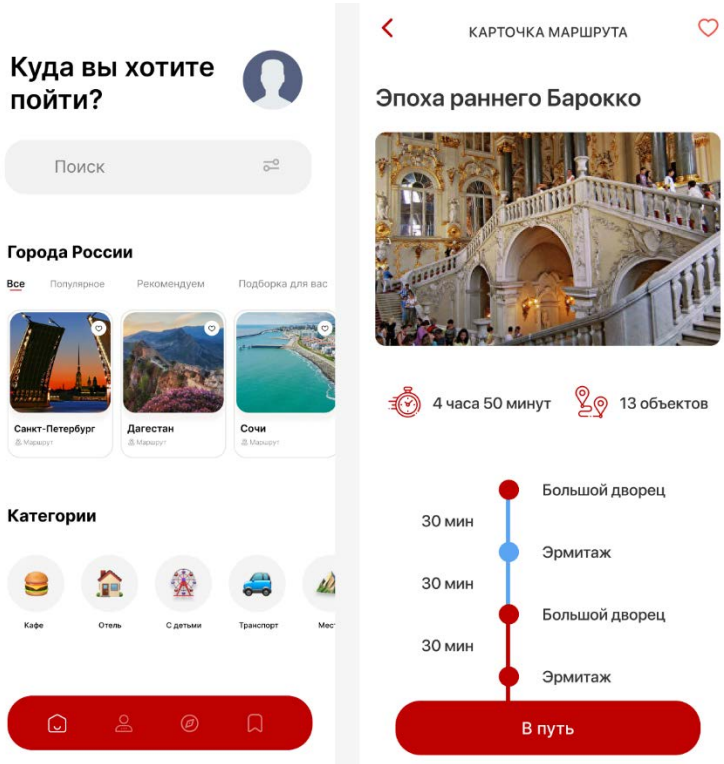


Рис. 2. Главное меню

После выбора города в приложении можно ознакомиться с доступными достопримечательностями, включая цены на билеты, график работы и отзывы других туристов. Затем, используя встроенные карты, можно проложить маршрут до выбранной достопримечательности (рис. 3).

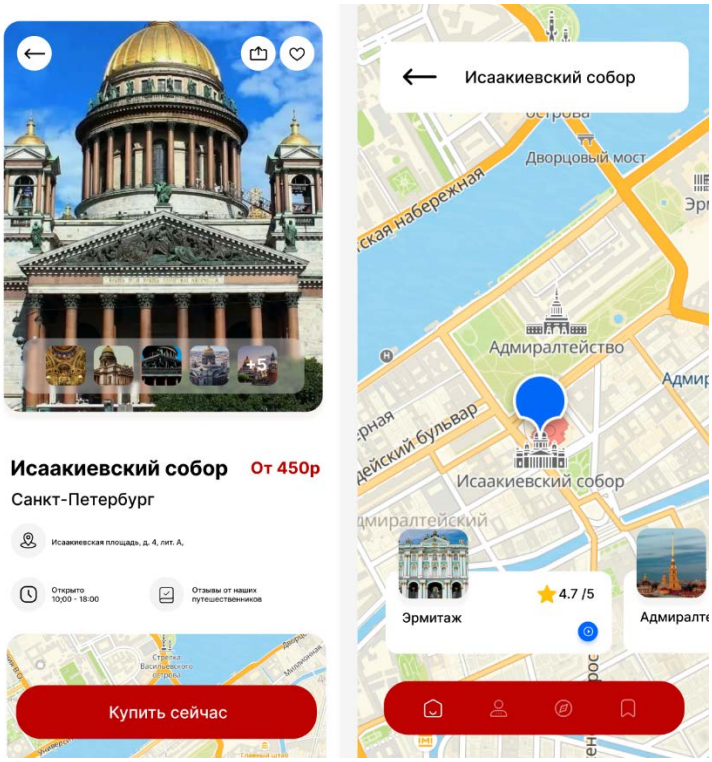


Рис. 3. Информация о достопримечательностях и карта маршрута

Заключение. Разработанное туристическое приложение предоставляет удобный и современный инструмент для планирования путешествий по России. Возможность выбора города, изучения достопримечательностей с учетом отзывов, цен, графика работы, получение актуальных рекомендаций в реальном времени, а также построение маршрутов делает приложение ценным помощником для путешественников. Дальнейшее развитие приложения может быть направлено на расширение функционала, например, добавление возможностей для общения пользователей и обмена опытом [10]. Это позволит создать еще более полноценную и удобную платформу для планирования и организации путешествий, что в свою очередь, будет способствовать повышению конкурентоспособности и привлекательности российского туризма.

Список литературы

1. Юсупова Р.М., Пырнова О.А. Применение технологий искусственного интеллекта для оцифровки, анализа и визуализации культурного наследия // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения: материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции. Казань, 2024. С. 1222-1226.

2. Алемасов Е.П., Зарипова Р.С. Основные аспекты развития сферы разработки мобильных приложений // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2020. № 1 (19). С. 110-112.

3. Казиханов Б.Р., Шорина Т.В. Влияние искусственного интеллекта на прогнозирование экономических показателей // Управление экономикой, системами, процессами. Сборник статей VII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2023. С. 242-244.

4. Емдиханов Р.А., Смирнов Ю.Н. Основные этапы и стратегии успешной цифровой трансформации // Технологический суверенитет и цифровая трансформация: материалы международной научно-технической конференции. Казань, 2023. С. 216-218.

5. Овсеенко Г.А. SMART-решения и системы искусственного интеллекта // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2021. № 2 (24). С. 71-74.

6. Nuriev M., Kalyashina A., Smirnov Yu., Gumerova G., Gadzhieva G. The 5G revolution transforming connectivity and powering innovations // E3S Web of Conferences. 2024. Т. 515. С. 04008.

7. Сметанин П.В., Николаева С.Г. Проектирование и разработка базы данных для туристического агентства // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2022. № 4 (30). С. 181-186.

8. Ильина Д. И., Зарипова Р. С. Современные тенденции развития мобильных приложений и их влияние на качество жизни людей // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 7. № 4 (145). С. 55-62.

9. Косулин В.В. Применение систем искусственного интеллекта для управления транспортным средством // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 12. С. 309-312.

10. Менциев А.У., Айгумов Т.Г., Амирова Э.Ф. Методы и технологии сбора и анализа данных в цифровой экономике // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12. № 11-1. С. 282-288.

Юсупова Регина Ильдаровна, студент, Россия, Казань, Казанский государственный энергетический университет,

Зарипова Римма Солтановна, канд. техн. наук, доцент, zarim@rambler.ru, Россия, Казань, Казанский государственный энергетический университет

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT MOBILE APPLICATION FOR TOURISM IN RUSSIA

R.I. Yusupova, R.S. Zaripova

The rapid development of digital technologies allows for their effective use in the field of tourism. Modern digital technologies play a key role in the development of the tourism industry, providing quick access to information. In this regard, the development of an intelligent mobile application is relevant in the context of the growing popularity of domestic tourism in Russia, where the number of tourists is constantly increasing. The article presents the process

of developing an intelligent mobile application for tourism in Russia, designed to solve the problem of information deficit for tourists travelling independently. The application uses artificial intelligence technologies for personalised recommendations, taking into account user preferences and relevant data on tourist sites. The application will help tourists to get up-to-date information about cultural and historical heritage sites, as well as routes, which in turn will affect the development of domestic tourism in the country.

Key words: tourism, mobile application, intelligent technologies, artificial intelligence, digitalisation, digital transformation of tourism, software development.

Yusupova Regina Ildarovna, student, Russia, Kazan, Kazan State Power Engineering University,

Zaripova Rimma Soltanovna, candidate of technical sciences, docent, zarim@rambler.ru, Russia, Kazan, Kazan State Power Engineering University

УДК 621.7
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-658-659

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИБКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ И СТАЛИ НА ЛИСТОШТАМПОВОЧНЫХ МОЛОТАХ

Р.Р. Шагалеев

В статье представлены результаты экспериментальных исследований одноугловой гибки листовых заготовок из цветных сплавов (АМг2Н, Д19АТ, Т1, 08Х15Н5Д2Т, 12Х18Н10Т) и стали 10 на листоштамповочном молоте (копре) с использованием стандартной бабы молота (копра) и бабы с наполнителем в виде стальных шариков. Установлено уменьшение угла пружинения (до 4,7 раз) и повышение точности изготовленных деталей при использовании бабы молота (копра) с наполнителем при отсутствии отскока инструмента от заготовки («прилипающий» удар) по сравнению с гибкой стандартной бабой молота.

Ключевые слова: листовая штамповка, одноугловая гибка, упругое пружинение, листоштамповочный молот, баба молота с наполнителем, цветные сплавы.

В условиях современного производства для изготовления различных деталей летательных аппаратов из различных материалов (углеродистые и коррозионностойкие стали, алюминиевые, магниевые и титановые сплавы: ВТ1-1, ОТ4, АМг2Н, Д19АТ, Т1, 08Х15Н5Д2Т (ВНС-2-Ш), 12Х18Н10Т и др.) с толщиной от 0,25 до 3,5 мм широко применяют процессы листовой штамповки заготовок на листоштамповочных молотах оснащённых дешёвыми и быстро изготавливаемыми свинцово-цинковыми штампами т.к. в рамках мелко- и среднесерийного производства изготавливать такие детали в инструментальных штампах экономически нерентабельно, поскольку увеличиваются затраты на изготовление сложных штампов и сроки производства. Простота конструкции и управления, невысокая стоимость, а также универсальность листоштамповочных молотов, позволяющая выпускать большую номенклатуру деталей, снижает затраты на оборудование и инструмент при единичном и мелкосерийном производстве.

Основными недостатками листоштамповочных молотов является низкий КПД ударного деформирования заготовки и низкая точность изготавливаемых деталей вследствие их упругого пружинения, которое устраняют обычно ручной доводкой, что ухудшает качество поверхности детали и увеличивает трудоёмкость.

Одним из направлений повышения размерной точности деталей и снижения упругого пружинения при гибке на листоштамповочных молотах является увеличение продолжительности ударного взаимодействия инструмента и заготовки путем удержания падающих частей молота в нижней точке при ударе при использовании специальных устройств [1-4].

В ранее проведенных исследованиях процесса гибки листовых заготовок из стали Ст3 и стали 10 толщиной 1 и 2 мм на молоте при использовании бабы молота (копра) с наполнителем и «жесткого» гибочного штампа с пуансоном и матрицей из инструментальной стали было установлено уменьшение угла пружинения до 4,5 раз и повышение точности изготовленных деталей при использовании бабы молота (копра) с наполнителем при отсутствии отскока инструмента от заготовки («прилипающий» удар) по сравнению с гибкой стандартной бабой молота [1-4].

В данной работе были проведены экспериментальные исследования одноугловой гибки листовых заготовок из цветных сплавов (АМг2Н, Д19АТ, Т1, 08Х15Н5Д2Т, 12Х18Н10Т) и стали 10 на листоштамповочном молоте (копре) с использованием стандартной бабы молота (копра) и бабы с наполнителем в виде стальных шариков.

Гибку заготовок и определение параметров удара проводили на специальном комплексе для экспериментальных исследований процесса гибки на молоте (копре), принципиальная схема и фотография которого представлена на рис. 1.

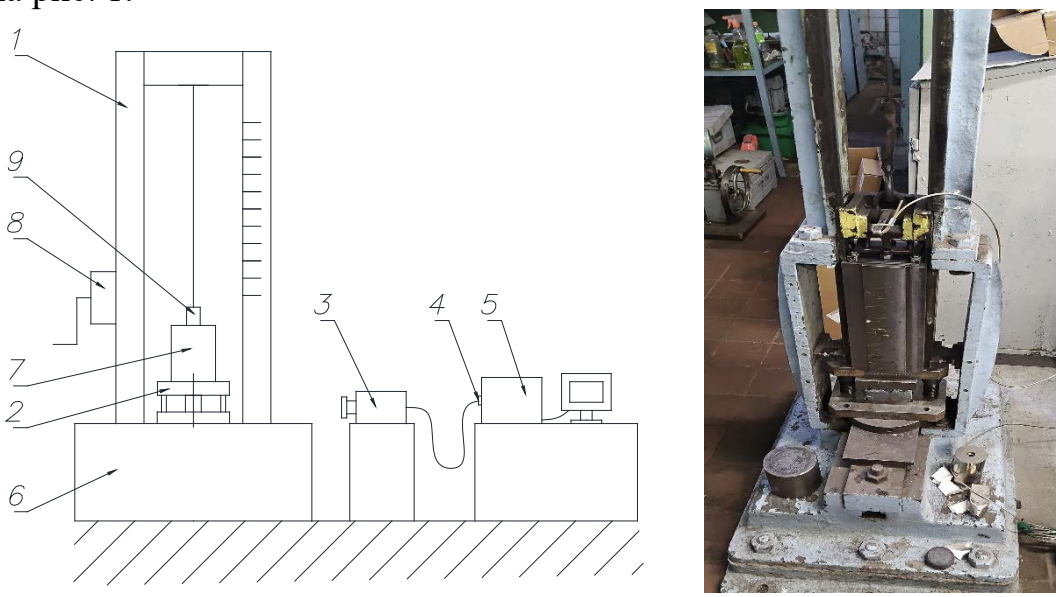


Рис. 1. Принципиальная схема и фотография комплекса для экспериментальных исследований: 1 –вертикальный копер; 2 – штамп; 3 - скоростная цифровая видеокамера; 4 - переходник; 5 - персональный компьютер; 6 - основание; 7 – баба; 8 - устройство подъема бабы; 9 – устройство захвата бабы

Комплекс состоит из вертикального копра и системы скоростной видеосъемки и включает вертикальный копер 1 с установленными на нем экспериментальным штампом 2 и систему высокоскоростной видеосъемки,

включающую камеру высокоскоростной видеосъемки 3 со встроенным модулем буферной памяти, PCI-контроллер 4 для интерфейса с камерой и персональный компьютер 5 для управления, предварительной обработки, записи и хранения видеоинформации.

Вертикальный копер 1 состоит из двух стоек и основания 6, сменной бабы 7, устройства для подъема 8 и захвата 9 для фиксации бабы. При подъеме бабы на необходимую высоту захват отпускают, и баба падает на верхнюю плиту штампа 2, деформируя при этом заготовку.

Гибку проводили с помощью экспериментального штампа с пуансоном и матрицей из инструментальной стали, показанного на рис.2. Угол пуансона составил α=90°, радиус пуансона R=2,5 мм.

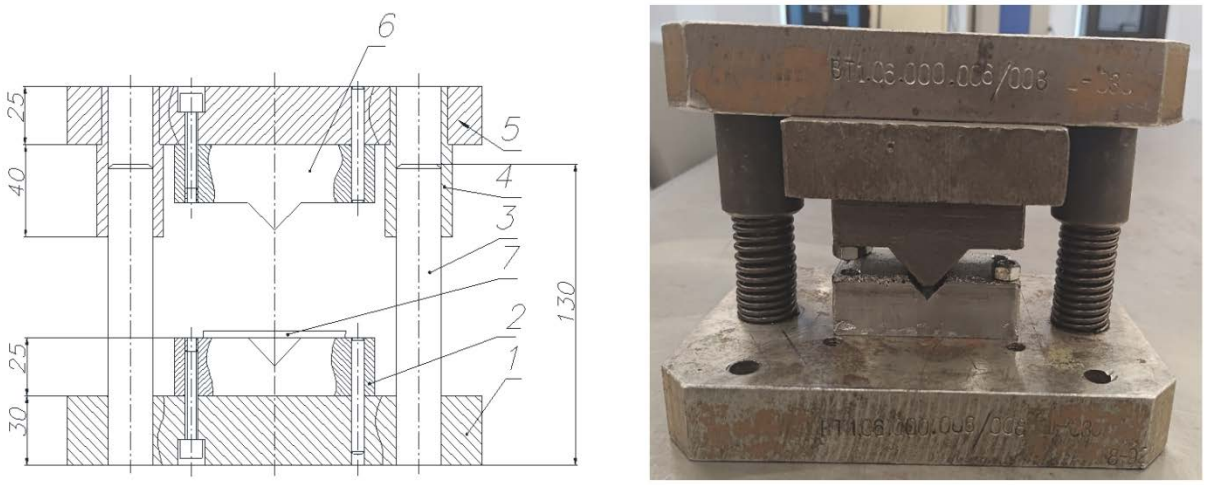


Рис. 2. Экспериментальный штамп для гибки: 1 - нижняя плита; 2 - матрица; 3 - колонка; 4 - направляющая втулка; 5 - верхняя плита; 6 - пуансон; 7 - заготовка

Для проведения экспериментов по гибке использовали листовые заготовки из цветных сплавов (АМг2Н, Д19АТ, Т1, 08Х15Н5Д2Т, 12Х18Н10Т) толщиной S=2 мм и размерами 30 х 40 мм.

Для гибки заготовок на копре использовали стандартную бабу массой $m_{бабы}$ = 22,3 кг, изготовленную из стали 45 (ГОСТ 1050-88) рис. 3.

Также для гибки заготовок использовали бабу с наполнителем [5, 6], состоящую из корпуса с внутренней полостью и засыпаемых внутрь шариков диаметром 6 мм из стали ШХ15. Корпус бабы был изготовлен из стали 45 (ГОСТ 1050-88). Между крышкой 1 бабы с наполнителем и шариками 4 установлена упругая прокладка 2 из поролона, которая обеспечивала предварительное упругое поджатие шариков в бабе (рис.4).

Масса корпуса бабы была равна 14,5 кг, отношение массы шариков к общей массе приняли равным 0,11.

Для возможности сравнения результатов экспериментов по гибке заготовок стандартной бабой и бабой с наполнителем их массы принимали одинаковыми и равными 22,3 кг. Для этого в бабе с наполнителем использовали крышку массой 6,207 кг, которая компенсировала недостаток массы бабы.



Рис. 3. Стандартная баба молота

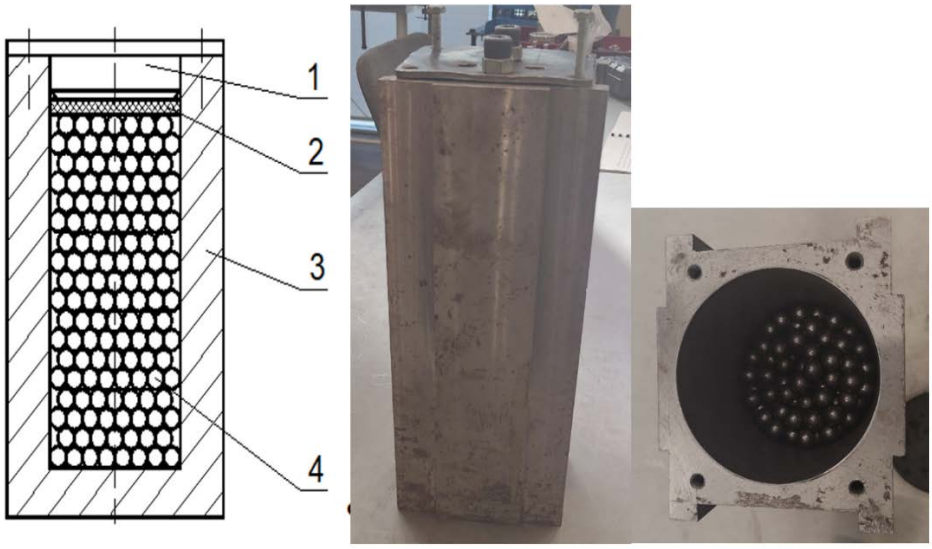


Рис. 4. Баба молота с наполнителем: 1 – крышка; 2 – упругая прокладка; 3 – корпус; 4 – шарики

В табл.1 приведены результаты экспериментов по гибке заготовок из цветных сплавов (АМг2Н, Д19АТ, Т1, 08Х15Н5Д2Т, 12Х18Н10Т) стандартной бабой молота и бабой молота с наполнителем.

Таблица 1

Результаты гибки заготовок из цветных сплавов

Марка материала	Стандартная баба молота		Баба молота с наполнителем	
	Угол пружинения $\Delta\alpha$, °	Продолжительность удара, мс	Угол пружинения $\Delta\alpha$, °	Продолжительность удара, мс
АМг2Н	0,90	16,66 (отскокпуансона)	0.19	нет отскока пуансона
Д19АТ	3,05	16,66 (отскокпуансона)	2,36	нет отскока пуансона
Т1	8,17	18,00 (отскокпуансона)	5,86	нет отскока пуансона
08Х15Н5Д2Т (ВНС-2-Ш)	10,14	16,66 (отскокпуансона)	8,46	нет отскока пуансона
12Х18Н10Т	1,8	14,66 (отскокпуансона)	1,2	нет отскока пуансона

Ранее на основе экспериментальных исследований гибки заготовок из стали 10 были построены математические модели процесса гибки листовых заготовок стандартной бабой и бабой молота с наполнителем в виде уравнений регрессии [7], определяющие зависимости угла пружинения $\Delta\alpha$ от угла гибки $X_1 = \alpha$, относительного радиуса гибки X_2 = R/S, отношения массы шариков к массе бабы молота X_3 и отношения массы одного шарика к массе бабы X_4:

- для гибки стандартной бабой молота:

$$\Delta\alpha_{ст}=0{,}106X_1^2+0{,}00215X_2^2-0{,}0109X_1X_2+0{,}965X_1-0{,}41032X_2+20{,}09337 \quad (1)$$

- для гибки бабой молота с наполнителем:

$$\Delta\alpha_{ст}=1{,}44126+0{,}3X_1-0{,}01667X_2+3X_3+2010{,}0051X_4 \quad (2)$$

Для использования полученных математических моделей гибки на молоте для расчета величины угла пружинения при гибке заготовок цветных сплавов уравнения (1) и (2) были уточнены путем введения поправочного коэффициента K, а также модуля упругости E и предела текучести материала σ_s:

$$\Delta\alpha_{\text{цв}} = \frac{K\sigma_s}{E}(1{,}44126 + 0{,}3X_1 - 0{,}01667X_2 + 3X_3 + 2010{,}0051X_4) \quad (3)$$

Сравнение экспериментальных и теоретических (расчетных) значений угла пружинения при гибке заготовок их цветных сплавов приведено в табл.2. При этом расхождение экспериментальных и теоретических данных не превышало 3%

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и теоретических (расчетных) значений угла пружинения при гибке заготовок их цветных сплавов

Марка материала	Модуль упругости $E*10^{-5}$ МПа	Предел текучести σ_sМПа	$\Delta\alpha^{\circ}_{\text{экс}}$	K	$\Delta\alpha^{\circ}_{\text{теор}}$	Расхождение, %
АМг2Н	0,71	100	0.19	0,0012	0,186	2,15
Д19АТ	0,70	310	2,36	0,00483	2,355	0,21
Т1	1,12	375	5,86	0,0158	5,826	0,58
08Х15Н5Д2Т (ВНС-2-Ш))	1,9	785	8,46	0,0184	8,372	1,05
12Х18Н10Т	1,98	236	1,2	0,092	1,207	0.57

Кроме этого, была проведена гибка листовой заготовок из стали 10 с использованием свинцово-цинкового гибочного штампа: пуансон был изготовлен из свинца марки С1 (угол 90°, R / S=2,5), матрица - из алюминиевого сплава АЦ13, применяемых в производственных условиях для изготовления изделий на листоштамповочных молотах.

Для изготовления рабочего инструмента свинцово-цинкового штампа методом FDM-печати из пластика PLA были напечатаны модели пуансона и матрицы, которые использовали для получения литейной песчаной формы в следующем порядке: в опоку помещали пластиковые модели пуансона и матрицы и элементы литниковой системы, далее заполняли опоку формовочной смесью и извлекали модели. После этого опоки собирали и производили заливку расплавленного алюминиевого сплава АЦ13. На рис. 5 показаны пуансон из свинца С1, матрица из алюминиевого сплава АЦ13, а также элементы литейной формы.

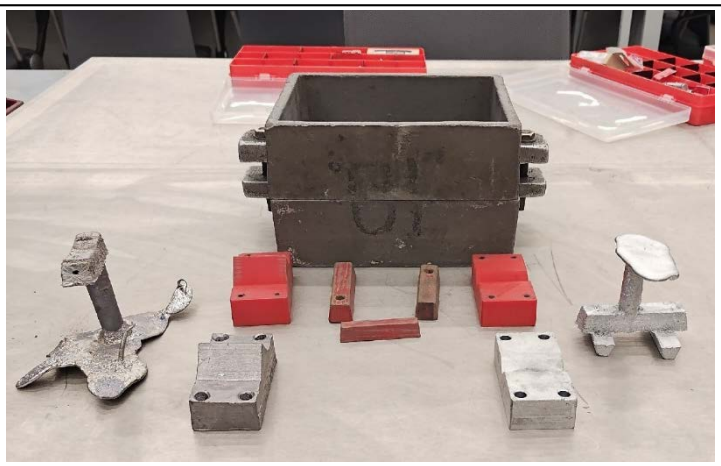


Рис. 5. Пуансон из свинца С1, матрица из алюминиевого сплава АЦ13 и элементы литейной формы

Сравнение результатов гибки заготовки из стали 10 в «жестком» штампе (пуансон и матрица – из инструментальной стали) и в свинцово-цинковом штампе приведено в табл.3.

Таблица 3

Сравнение результатов гибки заготовки из стали 10 в «жестком» и в свинцово-цинковом штампах

Направление прокатки заготовки	«Жесткий» штамп		Свинцово цинковый штамп		Расхождение, %	
	Угол пружинения, °					
	Стандартная баба молота	Баба молота с наполнителем	Стандартная баба молота	Баба молота с наполнителем	Стандартная баб молота	Баба молота с наполнителем
Вдоль	1,0	0,92	1,01	0,94	0,99	2,12
Поперек	1,24	0,95	1,27	0,99	2,36	4,04

В результате проведенного сравнения можно отметить, что расхождение результатов не превышает 4%

Проведенные экспериментальные исследования процесса гибки заготовок из цветных сплавов марок АМг2Н, Д19АТ, Т1, 08Х15Н5Д2Т, 12Х18Н10Т на молотах позволили установить, что при гибке заготовок с помощью бабы молота с наполнителем угол упругого пружинения заготовки уменьшается до 4,7 раз при полном отсутствии отскока инструмента от заготовки («прилипающий» удар) по сравнению с гибкой стандартной бабой молота.

При этом установлено, что угол упругого пружинения заготовок при гибке в «жестком» штампе практически идентичен углу пружинения при гибке в свинцово-цинковом штампе. Таким образом, можно отметить, что результаты гибки в штампе с пуансоном и матрицей из инструментальной стали будут корректными и для гибки в свинцово-цинковом штампе, который применяется на производстве.

Кроме этого, по результатам проведенных исследований были уточнены математические модели процесса гибки стальных заготовок путем введения поправочного коэффициента, учитывающего модуль упругости и

предел текучести материала, которые возможно использовать для определения зависимости угла пружинения от угла и относительного радиуса гибки, массы наполнителя относительно массы бабы и массы одного шарика,для гибки листовых заготовок из цветных сплавов марокАМг2Н, Д19АТ, Т1, 08Х15Н5Д2Т, 12Х18Н10Т.

Список литературы

1. Лавриненко В.Ю., Чуваев И.С. Экспериментальные исследования гибки листовых заготовок на молотах // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. №3 (317). С.133-136.

2. Лавриненко В.Ю., Шагалеев Р.Р., Чуваев И.С. Исследование зависимости упругого пружинения при гибке листовых заготовок от параметров бабы листоштамповочного молота с наполнителем // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. №3 (323). С.39-43.

3. Vladislav Y. Lavrinenko, Ruslan R. Shagaleev. The Method of Reducing of Springback Effect during Impact Bending of Sheet Steel Blanks // Materials Science Forum. 2019, Volume 973. P. 85-89. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.973.85.

4. Повышение точности деталей при штамповке на листоштамповочных молотах // XLIV академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства сборник тезисов: в 2 т. Том 2. Москва, 2020. С.429-430.

5. Патент на полезную модель РФ № 199522. Баба молота / Аюпов Т.Х., Лавриненко В.Ю., Семенов И.Е., Шагалеев Р.Р., Изикаева А.И., Кошелев О.В., Чекалов В.П., Чекалов В.В. опубл. 07.09.2020. Бюл. №25.

6. Патент на полезную модель РФ № 203749. Баба листоштамповочного молота / Лавриненко В.Ю., Семенов И.Е., Демин В.А., Шагалеев Р.Р. опубл. 19.04.2021. Бюл. №11.

7. Лавриненко В.Ю., Шагалеев Р.Р. Построение математической модели процесса гибки листовых заготовок с использованием бабы листоштамповочного молота с наполнителем // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. 4. С. 162-168.

Шагалеев Руслан Ринатович, ассистент, ruslanshag@mail.ru, Россия, Москва, Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

THE EXPERIMENTAL RESEARCH EXPERIMENTAL OF BENDING OF BLANKS OF NON-FERROUS ALLOYS AND STEEL ON SHEET-STAMPING HAMMERS

R.R. Shagaleev

The results of experimental studies of single-angle bending of sheet blanks made of non-ferrous alloys (AMg2N, D19AT, T1, 08Kh15N5D2T, 12Kh18N10T) and steel 10 on a sheet-metal stamping hammer (punching machine) using a standard hammer ram (punching machine) and a ram with filler in the form of steel balls are presented. A decrease in the

springback angle (up to 4.7 times) and an increase in the accuracy of manufactured parts when using a hammer ram (punching machine) with filler in the absence of a rebound of the tool from the blank ("sticking" blow) compared to a flexible standard hammer ram were established.

Key words: sheet metal stamping, single-angle bending, elastic springback, sheet-metal stamping hammer, hammer ram with filler, non-ferrous alloys.

Shagaleev Ruslan, assistant, ruslanshag@mail.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University

УДК 621.7.043
DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-665-666

ФОРМОВКА ТОНКОЛИСТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ С УВЕЛИЧЕННОЙ ГЛУБИНОЙ КАНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПОЗИТНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА

И.Е. Семенов, К.Д. Резнюк

В статье изложены результаты экспериментов по формовке тонколистовой заготовки из стали AISI304 толщиной 0.5 мм в открытом и закрытом объемах с помощью композитного эластичного инструмента. Установлено, что применение эластичного инструмента при закрытой формовке позволяет получить максимальную глубину каналов 2,2 мм, при этом максимальное утонение заготовки составляет 0,2 мм.

Ключевые слова: формовка эластичной средой, полиуретан, композитный рабочий инструмент, коррозионностойкая сталь.

Получение локальных углублений и каналов на тонколистовой заготовкежестким металлическим инструментом является сложным технологическим процессом. В данном случае максимальная глубина каналов ограничена особенностями самого процесса. При достижении определенных значений металл начинает разрываться, что приводит браку. Ограничения связаны с условиями трения на поверхности контакта пуансона и заготовки. Чем прочнее материал, тем меньше глубина получаемых каналов.

Для мягкой стали, в зависимости от толщины листа, максимальная глубина каналов H. мм, оценивается по формуле [1]:

$$H = \frac{B \cdot s}{S + 2.5}, \quad (1)$$

где B – ширина ребра, мм; s – толщина штампуемого материала, мм.

К примеру, для листа толщиной 0.5 мм, при ширине ребра канала 6 мм, максимальная величина достигает 1 мм.

Для коррозионностойкой стали значение значительно меньше.

Для получения больших значений глубины каналов используется штамповка с равномерно распределенным давлением по поверхности заготовки. Одним из таких является штамповка эластичной средой. При данном технологическом процессе давление распределяется равномерно в области каналов, за счет чего происходит равномерное распределение деформаций

[2]. Данная технология ограничена контактным давлением, которое зависит от характеристик рабочего инструмента, а также отспособа штамповки – в открытом или закрытом объемах.

Формовка каналов увеличенной глубины. Предметом исследования является процесс формовки тонколистовой заготовки из коррозионностойкой стали 08Х18Н10 (аналог AISI 304) толщиной 0.5 ммв открытом и закрытом объемах.

Для проведения эксперимента была подготовлена матрица (рис. 1) с двумя видами углублений – локальное углубление квадратной формы и W-образный канал. Этот элемент матрицы полностью повторяет часть матрицы реальноготеплообменника. Глубина каналов матрицы 2.5 мм при требуемой глубине каналов впластине теплообменника 2мм.



Рис. 1. Матрица для формовки каналов с увеличенной глубиной

Исходя из результатов экспериментов, описанных в [3-10], в качестве рабочего инструмента был выбран полиуретан ПФЛ-100-S и ПФЛ-100-А.

Формовка в открытом объеме. Эксперимент 1. Сила осадки, в первом случае, ограничена силой 140 кН. Зависимость силы осадки от перемещения представлена на рисунке 2. При использовании полиуретана ПФЛ-100-S степень деформации составляет 30%.

При использовании армированного полиуретана ПФЛ-100-А степень деформации составляет 20%.

Каналы, полученные при формовке полиуретаном ПФЛ-100-S в открытом объеме, представлены на рисунке 3.

Из рисунка 3а можно видеть, что на пластине отформовались только W-образные каналы, а локальные углубления не отформованы. Глубина получившихся W-образных каналов составляет 0.4±0.1 мм.

Каналы, полученные при формовке полиуретаном ПФЛ-100-А в открытом объеме, представлены на рисунке 4.

В отличие от ПФЛ-100-S, при применении ПФЛ-100-А, на пластине отформовались не только W-образные каналы, а также небольшие локальные углубления (рисунок 6а). Глубина W-образных каналов составляет 0.5±0.1 мм. Глубина локальных углублений составляет 0.3±0.1 мм.

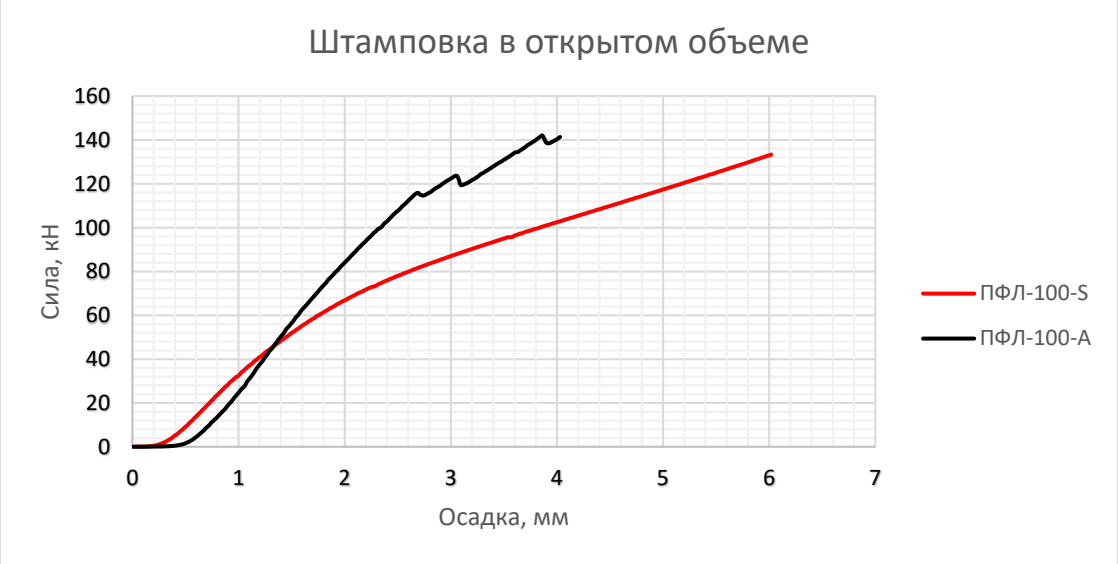


Рис. 2. График зависимости силы осадки от перемещения



а ***б***

Рис. 3. Эксперимент 1. Каналы, полученные формовой в открытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-S



а ***б***

Рис. 4. Эксперимент 1. Каналы, полученные формовой в открытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-А

Эксперимент 2. Во второй части эксперимента сила осадки была ограничена 250 кН. Зависимость силы осадки от перемещения представлена на рисунке 5. При использовании полиуретана ПФЛ-100-S степень деформации составляет 50%.

При использовании армированного полиуретана ПФЛ-100-А степень деформации составляет 40%.

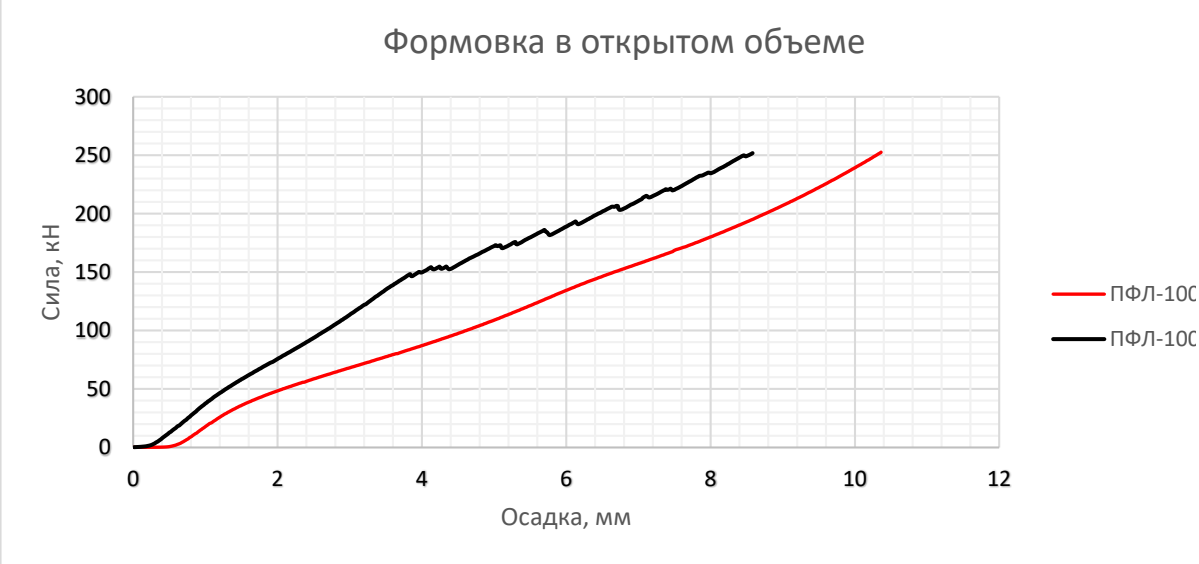
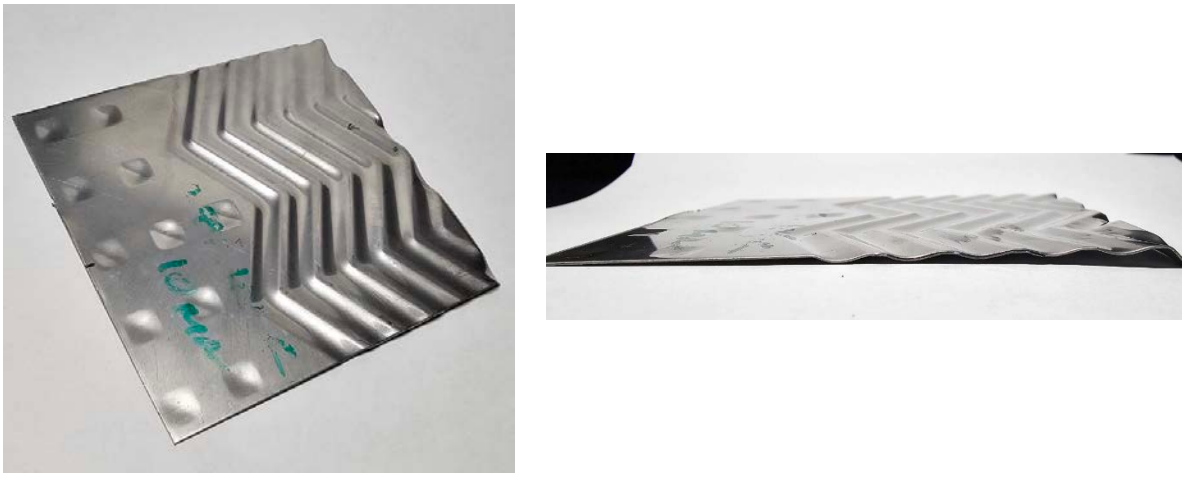


Рис. 5. График зависимости силы осадки от перемещения

Каналы, полученные при формовке полиуретаном ПФЛ-100-S в открытом объеме, представлены на рисунке 6.



а ***б***

Рис. 6. Эксперимент 2. Каналы, полученные формовкой в открытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-S

На рисунке 6а можно видеть отформованные W-образные каналы, а также локальные углубления. Глубина получившихся W-образных каналов составляет 0.8±0.1 мм. Глубина локальных углублений составляет от 0.4±0.1

мм до 0.5±0.1 мм. Максимальная глубина локальных углублений достигается ближе к геометрическому центру элемента пластины и уменьшается при приближении к краям. Толщина металла во впадине W-образного канала составляет 0.45 мм.

Каналы, полученные при формовке полиуретаном ПФЛ-100-А в открытом объеме, представлены на рисунке 7.

На рисунке 7а можно видеть отформованные W-образные каналы, а также локальные углубления. Глубина получившихся W-образных каналов составляет 0.9±0.1 мм. Глубина локальных углублений составляет от 0.5±0.1 мм до 0.7±0.1 мм. Максимальная глубина локальных углублений достигается ближе к геометрическому центру элемента пластины и уменьшается при приближении к краям. Толщина металла во впадине W-образного канала составляет 0.43 мм.



а ***б***

Рис. 7. Эксперимент 2. Каналы, полученные формовкой в открытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-А

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Применение эластичного инструмента для открытой штамповки позволяет деформировать сталь AISI304 толщиной 0.5 мм.

2. Максимальная глубина получившихся каналов элемента пластины теплообменника составляет 0.9 мм при относительной степени деформации полиуретана 50%.

3. При использовании композитного инструмента из ПФЛ-100-А глубина локальных углублений больше на 75-85% (0.9±0.1 мм при использовании ПФЛ-100-А, 0.5±0.1 мм при использовании ПФЛ-100-S) при одинаковой силе осадки 250 кН.

4. Толщина листа во впадине после деформации составляет 0.43 мм.

Формовка в открытом объеме. Эксперимент 3. Для формовки в закрытом объеме был подготовлен специальный контейнер (рисунок 8).

При формовкесила осаки была ограничена максимальной силой оборудования, равной 450 кН. Зависимость силы осадки от перемещения представлена на рисунке 9.

Каналы, полученные при формовке полиуретаном ПФЛ-100-S в закрытом объеме, представлены на рисунке 10.



Рис. 8. Контейнер для штамповки в закрытом объеме

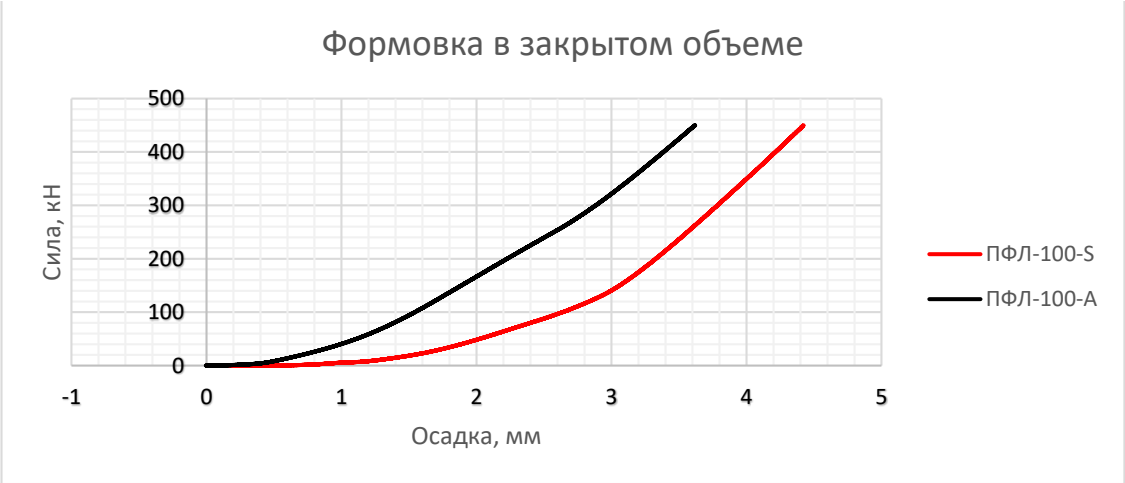


Рис. 9. График зависимости силы осадки от перемещения

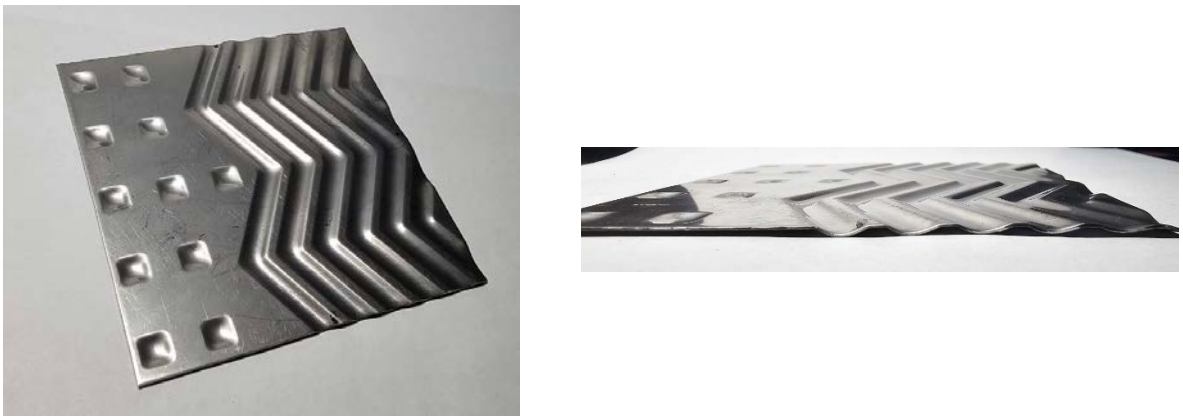


а ***б***

Рис. 10. Эксперимент 3. Элементы пластин теплообменника, полученные штамповкой в закрытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-S

На рисунке 10а можно видеть отформованные W-образные каналы, а также локальные углубления. Глубина получившихся W-образных каналов составляет 1.1±0.1 мм (рисунок 10а). Глубина локальных углублений составляет от 0.7±0.1 мм до 0.8±0.1 мм. Максимальная глубина локальных углублений достигается ближе к геометрическому центру элемента пластины и уменьшается при приближении к краям. Толщина металла во впадине W-образного канала составляет 0.4 мм.

Каналы, полученные при формовке полиуретаном ПФЛ-100-А в закрытом объеме, представлены на рисунке 11.



а ***б***

Рис. 11. Эксперимент 3. Элементы пластин теплообменника, полученные штамповкой в закрытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-А

На рисунке 11а можно видеть отформованные W-образные каналы, а также локальные углубления. Глубина получившихся W-образных каналов составляет 1.3±0.1 мм. Глубина локальных углублений составляет от 0.7±0.1 мм до 0.8±0.1 мм. Максимальная глубина локальных углублений достигается ближе к геометрическому центру элемента пластины и уменьшается при приближении к краям. Толщина металла во впадине W-образного канала составляет 0.4 мм.

Эксперимент 4. Для эксперимента №4 был использовангидравлический пресс силой 1600 кН). Цель эксперимента –определить усилие, при котором достигается требуемая геометрия элемента пластины теплообменника.

В ходе эксперимента было установлено, что сила, при которой происходит полное заполнение матрицы составляет 1250 кН.

Каналы, полученные при формовке полиуретаном ПФЛ-100-S в закрытом объеме, представлены на рисунке 12.Глубина получившихся W-образных каналов составляет 2.2±0.1 мм (рисунок 12а). Глубина локальных углублений составляет от 1.9±0.1 мм до 2.0±0.1 мм. Максимальная глубина локальных углублений достигается ближе к геометрическому центру элемента пластины и уменьшается при приближении к краям. Толщина металла во впадине W-образного канала составляет 0.3 мм.



а *б*

Рис. 12. Эксперимент 4. Элементы пластин теплообменника, полученные штамповкой в закрытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-S

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Применение эластичного инструмента для закрытой формовки позволяет деформировать сталь AISI304 толщиной 0.5 мм.
2. Максимальная глубина получившихся каналов составляет 2.2 мм.
3. Глубина локальных углублений составляет от 1.9±0.1 мм до 2.0±0.1 мм.
4. Толщина листа во впадине после деформации составляет 0.3 мм. Максимальное утонение листа составляет 0.2 мм.

Список литературы

1. Semenov I.E., Ryzhenko S.N., Krutova M.V. Modeling the process of deformation of a strip by an elastic and rigid working tool Steel., No. 5, 2007. P. 83-87.

2. Isachenkov E.I. Stamping with rubber and liquid. M. Mechanical Engineering, 1967. P. 36, 39, 212-215.

3. Semenov I.E., Ryzhenko S.N., Povorov S.V. Dynamic modeling of the process of local bending-molding for the production technology of roof coatings. Procurement in engineering. 2007. No. 10. P. 40-43.

4. Semenov I.E., Ryzhenko S.N., Povorov S.V. Investigation of the stress-strain state of an elastic working tool and sheet blank in the process of local bending-molding. Proceedings of the Seventh Conference of CADSoftware Users–FEMGmbH. M.: Polygon press, 2007. P. 350-354.

5. Semenov I.E., Savchuk D.V. Increasing the rigidity of an elastic working tool for processing thin sheet metal by creating composite material based on polyurethane elastomers and synthetic aramide fabrics. Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal), 2020. #12(64). P. 33-41.

6. Semenov I.E., Ryzhenko S.N., Povorov S.V. Modeling the molding process on a roll forming mill with an elastic working tool.Vestnik MSTU., 4 (79). 2010. P. 86-93.

7. Semenov I.E., Ryzhenko S.N., Povorov S.V. Modeling of the processes of sequential molding of longitudinal channels in a sheet on a mill with an elastic and rigid tool. Procurement in engineering. Forging and stamping production., 2010. No. 6. P. 29-32.

8. Semenov I.E., Povorov S.V. Simulation of thin-sheet metal blanking and punching by elastic mediums // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. 537 (3). No 032027.

9. Semenov I.E., Povorov S.V. Method for calculating of cross-sectional dimensions of sheet blank at intermediate stages of rollerformingprocess. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. No 8501838.

10. Ikonnikov D.A., Semenov I.E. Thin sheet metall forming with composite material. IOP Conference Series: Materials Sciece and Engineering 2020 vol. 734. Issue 1. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012070.

Семенов Иван Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, sieprof@mail.ru, Россия, Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,

Резнюк Кирилл Дмитриевич, аспирант, kirill.reznyuck@yandex.ru, Россия, Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

STAMPING OF THIN-SHEET PRODUCTS WITH INCREASED GROOVES DEPTH USING COMPOSITE TOOLS BASED ON POLYURETHANE

I.E. Semenov, K.D. Reznyuk

The results of experiments on forming a thin-sheet blank made of AISI304 steel with a thickness of 0.5 mm in open and closed volumes using a composite elastic tool are presented. It was found the application of an elastic tool in closed forming allows to obtain a maximum channel depth of 2.2 mm, while the maximum thinning of the blank is 0.2 mm.

Key words: elastic stamping, polyurethane, composite working tools, stainless steel.

Semenov Ivan Evgenievich, doctor of technical sciences, professor, sieprof@mail.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University,

Reznyuk Kirill Dmitrievich, postgraduate, kirill.reznyuck@yandex.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

А.С. Макаров, Д.И. Попов, В.В. Харламов
Исследование процесса изнашивания электрических щеток в скользящем контакте синхронного тягового генератора …….. 3

А.В. Муратов, И.К. Кулишев
Улучшение световых показателей тягового подвижного состава …….. 10

А.В. Фролов, Н.А. Петраков, В.И. Голубева
Исследование работы ёмкостного фильтра в импульсном преобразователе напряжения ……... 15

С.П. Черный, М.А. Лямин, А.В. Бузикаева, С.А. Пячин
Согласованное управление электроприводами типа мотор – колесо с применением теории нечетких множеств ……... 30

В.В. Солецкий, Д.А. Киба, М.А. Бородин
Разработка стенда для определения характеристик винтомоторной группы летательного аппарата в различных средах …….. 40

В.М. Степанов, П.К. Сергеев
Виртуальное моделирование цифровых подстанций с целью снижения затрат и повышения устойчивости энергосистемы …….. 48

И.Ф. Байбиков, А.В. Стариков
Повышение быстродействия следящих электроприводов прецизионных станков с синхронными исполнительными двигателями …… 51

Ю.Н. Иванников, Ю.А. Макаричев, Е.А. Полянский
Моделирование электромагнитных усилий в трехфазном стержневом трансформаторе …… 59

А.С. Чистяков, В.Я. Фролов, Г.В. Подпоркин
Методика повышения ресурса работы грозозащитных разрядников ……. 69

Е.Ю. Енькин, В.Я. Фролов, А.С. Чусов, А.Д. Сиваев
Разработка взрывобезопасной конструкции корпуса мультикамерного разрядника закрытого типа ……. 80

Д.В. Коткин, Н.Д. Зарецкий, Е.Ю. Енькин, В.Я. Фролов, Д. Белько
Схемы грозозащиты двухцепных воздушных линий 110 кВ с молниезащитным тросом ……..... 88

А. Саббаган, В.Я. Фролов, Ю.Н. Кожубаев, А.А. Милицын, Р.В. Ершов
Методы утилизации шахтных газов для производства электроэнергии и тепла ……... 97

Р.В. Ершов, Хаодун Чэн, А.В.Милицын, Ю.Н. Кожубаев, А.А. Милицын
Оптимизация режимов энергосистем и электростанций ……. 110

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

М.Ю. Козьминых
Совершенствование мониторинга безопасности высокотехнологичных предприятий ……. 126

А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин
Создание сетевой модели процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования ……. 138

И.А. Бакулин, Л.М. Червяков, Н.А. Бычкова
Моделирование технических требований к программным продуктам …….. 143

Н.А. Смирнов, Л.М. Червяков, Н.А. Бычкова
Повышение эффективности поисковых запросов высоконагруженных приложений …….. 152

А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин, С.А. Васин, Д.А. Пронин
Анализ характеристик процесса технического обслуживание и ремонта полигонного оборудования и выбора коэффициента для дальнейшего мониторинга ……. 158

Е.С. Квас, А.П. Бобрышов, В.П. Кузьменко, С.В. Солёный
Адаптивный алгоритм определения уровня жидкости в таре на роботизированных линиях розлива ……... 163

А.А. Гореликов, Е. В. Плахотникова, С. И. Соловьев
Методика идентификации типа организационной модели предприятия для адаптации системы бережливого производства …… 178

А.А. Ахрамович, Е.В. Борисова, П.Ю. Архипов, С.А. Одиноков
Применение проектного подхода для развития систем менеджмента на основе СТО ГАЗПРОМ 9001-2018 …… 186

И.А. Беляева, В.Н. Козловский, Д.И. Панюков, Е.В. Пантюхина
Алгоритм рационализации вариативности проектирования силовой установки с точки зрения обеспечения качества подбора электродвигателя …….. 192

И.Н. Пузовик, О.Г. Гусева, П.А. Лонцих, О.М. Сафонова, Н.П. Лонцих, А.Е. Пашков
Метод диакоптики и модель управления инспектированием оборудования на основе факторов риска для совершенствования экспертных подходов …… 200

Е.К. Савич, И.П. Васильева, Е.А. Тарасова
Цифровой инструментарий процесса управления персоналом в системе менеджмента качества ……. 207

В.Г. Абызов, Ю.И. Денискин, Г.А. Васин
Метод определения организацией обязательных требований страны назначения к продукции …….. 214

В.Ю. Рогов, П.А. Лонцих, О.М. Сафонова, А. Е. Пашков
Моделирование рисков малого машиностроительного предприятия в процессе диверсификации …… 220

О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко, С.А. Шеметюк, П.А. Козлов
Обоснованное целеполагание при планировании производственной деятельности промышленного предприятия ……. 228

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

А.М. Чуднов, Л.П. Сапунова, В.Р. Бикбулатов
Модель канала передачи данных с обратной связью в условиях воздействия преднамеренных помех с ограниченной средней мощностью …… 243

В.В. Ветров, М.А. Губарев, Е.М. Костяной, А.М. Степанов, А.А. Ширяев
Анализ рациональных подходов к аэродинамическому проектированию …… 252

Тун Мин У, С.А. Лупин
Структура имитационной модели пассажирской транспортной системы ……. 266

Ю.И. Битюков, Ю.И. Денискин, П.Ю. Битюков
Об использовании алгоритма Брегмана и метода наименьших квадратов в схемах подразделений …….. 275

Е.В. Ляпунцова, А.А.С. Арм
Федеративная графовая нейронная сеть для обнаружения сетевых аномалий с сохранением конфиденциальности ……. 285

А.А. Перфильев, С.А. Лупин
Использование средств моделирования при проектировании MESH-сетей ……. 294

А.В. Челенко, П.А. Новикова
Комплексный подход к достижению совершенства через устранение скрытых потерь …… 303

М.С. Андрющенко, В.М. Степанов
Поляризационные характеристики радиолокационного отражения лесных и прилегающих к ним покровов в миллиметровом диапазоне длин волн ……. 312

А.П. Зверев, В.В. Кузьмин, А.И. Карнюшкин
Алгоритм IFDE0 для определения размеров льдины во время ледохода …….. 323

С.С. Пригожаев, А.С. Кузьмин, А.А. Пыхалов
Статистические данные как инструмент системного анализа надёжности и безопасности перевозок ……... 331

Д.И. Коньков
Методика управления радиочастотным спектром для обеспечения электромагнитной совместимости средств и комплексов радиосвязи ……... 343

М.С. Андрющенко, С.А. Сахнов, В.Ю. Галаев
Защита электронного оборудования, размещаемого в зданиях, от мощных электромагнитных воздействий ……. 352

П.В. Пугаев, Д.И. Кондаков
Использование программного обеспечения и компьютерного моделирования для исследования технологического процесса ……. 363

Е.Е. Майоров, А.Г. Федоренко, Р.Б. Гулиев, А.В. Дагаев
Рефрактометрические методы и средства исследования оптических свойств водных растворов гидроксида калия ……. 367

О.В. Чуприков, В.И. Котовщиков
Утомление и его влияние на работоспособность водителя ……. 376

М.А. Синелюбов
Анализ прочностных характеристик балок компьютерным моделированием ….. 383

А.С. Подшибякин, О.М. Степанюк
Разработка и применение метода оперативного выявления HTTP-туннелирования в сетевом трафике информационно-телекоммуникационных систем ……. 387

Е.Е. Майоров, Ю.М. Бородянккий, Р.Б. Гулиев, А.В. Дагаев, И.С. Таюрская
Исследование плоского микроэлемента оптической системы на основе фольги родиевой экспериментальной интерференционной установкой …… 399

В.В. Тельбух, П.А. Глыбовский, А.С. Гудков; И.А. Ратушняк
Подход к проектированию интеллектуальной вопросно-ответной системы, построенной на основе применения нейронных сетей …… 406

М.М. Бычковский
Оценка влияния среды с потерями на электрические характеристики подземных антенн ……..... 418

О.С. Крюков, А.Г. Волошко, А.Н. Ивутин
Метод автоматического построения модели параллельной программы на языке GO …….. 420

Р.А. Ишмуратов, Р.С. Зарипова
Оценка эффективности различных методов спектрального анализа временных рядов с использованием цифровых технологий ……... 433

Д.А. Антропов
Методические подходы к повышению эффективности функционирования систем многоканальной радиосвязи в сложных электромагнитных условиях ….. 442

М.Н. Болгов, Н.В. Болгов
Организационно-правовой феномен создания систем искусственного интеллекта …… 449

М.В. Дворников, А.В. Богомолов, С.В. Кучевский
Метод автоматизированного контроля состояния летчика в полете …….. 458

С.В. Кучевский
Математическая модель моторных действий летчика при пилотировании воздушного судна …… 465

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

В.А. Нилов, В.А. Жулай, В.Л. Тюнин, Е.В. Федоров
Рабочее оборудование фронтального погрузчика …… 471

И.А. Данилов, А.А. Иванов, С.А. Войнаш
Анализ конструкций модульных подвесок в современном машиностроении ….. 477

И.А. Викторов, А.А. Иванов, С.А. Войнаш
Обзор технических решений активных подвесок сидений на мобильных энергетических средствах ……... 485

С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, И.И. Полупан
Монтаж и демонтаж гибких эластичных трубопроводов быстроразъемным соединением ……. 494

СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

В.В. Абрамов
Оценка формоизменения микровыступов и развития контакта между разнородными кристаллическими материалами при термодеформационном воздействии …….. 502

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Л.А. Сладкова, С.Е. Хоцеловский
Комплектование средств механизации при устранении последствий чрезвычайных ситуаций …….. 519

А.А. Борисов
Теоретическое исследование вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерном загрузочно-ориентирующем устройстве с наклонным диском и тангенциальными карманами ……. 530

И.В. Надеждин
Загрузочные устройства с рекуперацией энергии для автоматизированных систем …… 539

А.А. Борисов, С.А. Васин, Е.В. Пантюхина
Математическая модель и теоретическое исследование производительности бункерного загрузочно-ориентирующего устройства с наклонным диском и тангенциальными карманами для сложных ступенчатых заготовок …….. 551

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

С.В. Стельмащук, Р.Е. Хохлов
Модель движения мобильного трехколесного робота как объекта управления 558

Д.А. Ковалёв
Декомпозиция содорегенерационного котлоагрегата как сложного объекта управления …… 566

В.Н. Хрульков
Разработка модели системы управления подвеской многоопорной транспортной машины с применением теории мягких вычислений …….. 578

Н.К. Третьяков, В.Е. Кузнецов
Оптимальная схема драйвера транзистора импульсных источников питания ….. 586

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

И.А. Донюков, И.В. Поцебнева
Определение оптимальных режимов нагрева муфт из МЭПФ ……... 594

А.В. Королев, А.С. Бондарева, А.А. Королев
Модель удара сферического индентора по обрабатываемой поверхности в процессе ультразвуковой обработки ……... 605

А.В. Клюканов
Маневровое устройство вагонов и оценка эффективности его применения на путях необщего пользования ……. 614

Д.Е. Бочкова, М.Н. Бобков, В.Д. Артамонов
Определение размеров труб-заготовок для механической обработки ……... 624

Ле Чи Винь, В.П. Кольцов, Д.А. Стародубцева, Е.В. Тардыбаева
Экспериментальное исследование остаточных напряжений в поверхностном слое детали при зачистке лепестковым кругом ……..... 633

И.А. Донюков, Е.А. Агеева
Расчет процесса нагрева цилиндрических тел в радиационных установках ……. 643

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Р.И. Юсупова, Р.С. Зарипова
Разработка интеллектуального мобильного приложения для туризма по России …….. 650

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Р.Р. Шагалеев
Экспериментальные исследования гибки заготовок из цветных сплавов
и стали на листоштамповочных молотах …….. 658

И.Е. Семенов, К.Д. Резнюк
Формовка тонколистовых изделий с увеличенной глубиной каналов
с помощью композитного инструмента на основе полиуретана …… 665

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 2

Редактор С.Н. Ларин

Компьютерная правка и верстка – Б.С. Яковлев

Учредитель:
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97
Подписано в печать 24.03.25. Дата выхода в свет 31.03.25
Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная
Усл.-печ. л. 110,66
Тираж 500 экз. Заказ 032
Цена свободная

Адрес редакции и издателя:
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95