

Входит в перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный экспертными советами Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ

ISSN 1813-9108 (Print)

# Современные технологии системный анализ Моделирование

2023  
№ 3 (79)

Иркутский государственный  
университет путей сообщения

Машиностроение • Транспортные системы • Информационные технологии



2023 № 3(79)  
No. 3(79)

# Modern technologies System analysis Modeling

2023  
No. 3 (79)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

Modern technologies.  
System analysis. Modeling

Подписной индекс  
в каталоге «Урал-Пресс» – 64556

Зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).  
Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • Иркутский государственный университет путей сообщения

Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • Иркутский государственный университет путей сообщения

**Современные технологии**  
**Системный анализ**  
**Моделирование**

**№ 3 (79)**  
**2 0 2 3**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **А.П. Хоменко**  
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

---

#### Приоритетные цели журнала

- передача знаний и опыта, накопленного мировым сообществом и научными школами университета;
- выработка новых знаний в области механики, машиностроения, информатики и транспорта для решения актуальных проблем современной техники;
- ознакомление читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок по техническим наукам.

#### Стратегические задачи

- предоставлять ученым возможность публиковать результаты своих исследований;
- привлекать внимание к наиболее актуальным перспективным и интересным направлениям научных исследований по тематике журнала;
- обмен мнениями между исследователями из разных регионов и государств.

#### Учредитель и издатель

Иркутский государственный университет путей сообщения  
(664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

#### Главный редактор

А.П. Хоменко, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

#### Заместители главного редактора

Д.В. Буторин, к.т.н., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

#### Редакционный совет

А.И. Артюнин, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

И.В. Бычков, академик РАН, Иркутский государственный университет (Иркутск, Российская Федерация)

И.И. Галиев, д.т.н., проф., Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Российская Федерация)

А.В. Лившиц, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

А.В. Крюков, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

М.И. Кузьмин, академик, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск, Российская Федерация)

Н.А. Махутов, д.т.н., проф., член-корреспондент РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Российская Федерация)

В.В. Москвичев, д.т.н., проф., Институт вычислительных технологий СО РАН (Красноярск, Российская Федерация)

В.Е. Гозбенко, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

А.В. Мурыгин, д.т.н., проф., Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва (Красноярск, Российская Федерация)

С.И. Носков, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

С.М. Овчаренко, д.т.н., доц., Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Российская Федерация)

П.М. Огар, д.т.н., проф., Братский государственный университет (Братск, Российская Федерация)

Та Зуи Фыонг, к.ф.-м.н., доц., Ханойский институт математики (Вьетнам)

Р. Энхбат, д.ф.-м.н., проф., Монгольский национальный университет (Монголия)

Здислав Якиевич, д.т.н., проф., Университет штата Аризона (США)

А.С. Янюшкин, д.т.н., проф., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (Чебоксары, Российская Федерация)

**Адрес редакции:** 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

**Телефон:** +7(3952) 63-83-74

**Сайт:** <https://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>

**e-mail:** [stsam@irgups.ru](mailto:stsam@irgups.ru)

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Подписной индекс в каталоге «Урал-Пресс» – 64556.

Включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ); Ulrich's Periodicals Directory; ВИНТИ РАН.

Входит в перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный экспертными советами Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования РФ по группам научных специальностей: машиностроение; транспортные системы.

# Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2023  
No. 3 (79)

Founded in 2004

Published quarterly

## Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

### Aims and Scope

- transfer of knowledge and experience gained by the world community and schools of thought of the university;
- development of new knowledge in the field of mechanics; mechanical engineering; computer science; transport to solve topical problems of modern technology;

- acquaint the readers with the world's best practices in the implementation of scientific developments in technical sciences.
- provide scientists with an opportunity to publish the results of their researches;
- attract attention to the most relevant and promising areas of research on the subject of the journal;
- exchange of opinions between researchers from different regions and states.

### Founder and publisher

Irkutsk State Transport University  
(15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russian Federation)

### Editor-in-Chief

A.P. Khomenko, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

### Deputy Editor-in-Chief

D.V. Butorin, Ph.D. in Engineering Science, Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

### Editorial council

A.I. Artyunin, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

I.V. Bychkov, Member of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk State University (Irkutsk, Russian Federation)

I.I. Galiev, D.Sc. in Engineering, Prof., Omsk State Transport University (Omsk, Russian Federation)

A.V. Livshits, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

A.V. Kryukov, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

M.I. Kuzmin, Academician, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russian Federation)

N.A. Makhutov, D.Sc. in Engineering, Prof., Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

V.V. Moskvichyov, D.Sc. in Engineering, Prof., Institute of Computational Technologies, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russian Federation)

V.E. Gozbenko, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

A.V. Murygin, D.Sc. in Engineering, Prof., Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

S.I. Noskov, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

S.M. Ovcharenko, D.Sc. in Engineering, Assoc. Prof., Omsk State Transport University (Omsk, Russian Federation)

P.M. Ogar, D.Sc. in Engineering, Prof., Bratsk State University (Bratsk, Russian Federation)

Ta Zui Fuong, Ph.D. in Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Hanoi Institute of Mathematics (Vietnam)

R. Enkhbat, D.Sc. in Physics and Mathematics, Prof., Mathematics of National University of Mongolia (Mongolia)

Zdislav Yakievich, D.Sc. in Engineering, Prof., Arizona State University (USA)

A.S. Yanyushkin, D.Sc. in Engineering, Prof., Ulyanov Chuvash State University (Cheboksary, Russian Federation)

**Адрес редакции:** 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russia

**Tel.:** +7(3952) 63-83-74

**Web-Site:** <https://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>

**e-mail:** [stsam@irgups.ru](mailto:stsam@irgups.ru)

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications. Registration Certificate ПИ № ФС77-66109 от June 20, 2016

The subscription index in the Russian catalogue «Ural-Press» is 64556.

Has been included in the Russian Science Citation Index (RSCI); Ulrich's Periodicals Directory.

The journal is included in the list of leading scholarly journals

and editions in which the main results of dissertations for the scientific degree of a doctor and candidate of sciences, approved by the expert councils of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for groups of scientific specialties:

- Mechanical engineering;
- Transport systems.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Машиностроение и машиноведение**

- Артюнин А.И., Суменков О.Ю.** Эффект «застревания» маятника на вращающемся валу механической системы и его аналоги ..... 10
- Кильметова Л.Р.** Определение уровня остаточных напряжений методом компьютерного моделирования при точении жаропрочных материалов ..... 22
- Белоголов Ю.И.** Использование осевых упоров и полимерных гасителей динамических нагрузок в затворах с тонкостенными уплотнениями ..... 34

**Транспорт**

- Крюков А.В., Черепанов А.В., Серёдкин Д.А., Фесак И.А.** Моделирование режимов системы тягового электроснабжения, использующей трансформаторы с обмотками, соединенными в открытый треугольник ..... 44
- Бирюков А.Э., Сорокин Д.Г.** Математическая модель асинхронного электродвигателя с учетом насыщения и нагрева ..... 58
- Оленевич В.А., Власова Н.В.** Транспортно-логистические услуги и сервисы ОАО «РЖД», их восприятие на транспортном рынке и основные направления развития ..... 77
- Гришкова Д.Ю.** Предпосылки изменения схемы движения автотранспорта на терминале ..... 87
- Нехаев В.А., Леоненко Е.Г.** Неравноупругость железнодорожного пути и ее учет в математических моделях подвижного состава ОАО «Российские железные дороги» ..... 97
- Овечкин И.С., Пузина Е.Ю.** Разработка технических решений по уменьшению искажения синусоидальности кривой напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки ..... 112
- Кулинич Ю.М., Стародубцев Д.А.** Повышение качества регулирования асинхронных двигателей с модальным управлением ..... 124
- Ковенькин Д.А., Туманов Д.О., Шаванов Н.Д.** Оценка эффективности теплоизоляционных материалов с помощью проведения тепловых прогнозных расчетов ..... 135
- Трескин С.В., Дульский Е.Ю., Иванов П.Ю., Ромашов А.В.** Анализ влияния технического состояния песочных систем локомотивов на количество внеплановых ремонтов тягового подвижного состава и пути совершенствования их конструкции ..... 146
- Иванова Т.В., Рудаков В.А., Ковригина И.В.** Прогнозирование числа отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде на основе статистической оценки ..... 159

**Информационные технологии, управление и обработка**

- Мухутдинов А.Р., Вахидова З.Р., Ефимов М.Г.** Моделирование процесса кумуляции для определения толщины и прогиба сегментной облицовки заряда перфоратора, обеспечивающего максимальную глубину пробития ..... 172
- Буданов А.В., Петров Н.В., Нозирзода Ш.С., Петрова Е.Д.** Определение гидравлических характеристик трубопроводной арматуры при использовании конечно-элементного анализа ..... 181

## CONTENTS

**Machine Building and Theoretical Engineering**

**Artyunin A.I., Sumenkov O.Yu.** The effect of the «jamming» of the pendulum on the rotating shaft of the mechanical system and its analogues ..... 10

**Kil'metova L.R.** Determining the level of residual stresses by computer simulation in turning heat-resistant materials ..... 22

**Belogolov Yu. I.** The use of axial stops and polymer dynamic load absorbers in gates with thin-walled seals ..... 34

**Transport**

**Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Seredkin D.A., Fesak I.A.** Modeling modes of a traction power supply system using transformers with windings connected into an open triangle ..... 44

**Biryukov A.E., Sorokin D.G.** Mathematical model of an induction machine with consideration of saturation and heating ..... 58

**Olentsevich V.A., Vlasova N.V.** Transport and logistics services and services of JSC «Russian Railways», their perception in the transport market and the main directions of development ..... 77

**Grishkova D.Yu.** Prerequisites for changing the traffic pattern at the terminal ..... 87

**Nekhaev V.A., Leonenko E.G.** The non-uniform elasticity of the railway track and its considering in mathematical models of rolling stock of JSC «Russian Railways» ..... 97

**Ovechkin I.S., Puzina E.Yu.** Development of technical solutions to reduce the distortion of the sinusoidal voltage curve of overhead lines supplying automatic blocking devices ..... 112

**Kulinich Yu.M., Starodubtsev D.A.** Increasing the regulation quality of asynchronous induction motors with modal control ..... 124

**Koven'kin D.A., Tumanov D.O., Shavanov N.D.** Evaluation of the efficiency of thermal insulation materials by conducting thermal forecast calculations ..... 135

**Treskin S.V., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Romashov A.V.** Analysis of the influence of the locomotive sand systems' technical condition upon the number of unplanned repairs of traction rolling stock and ways to improve their design ..... 146

**Ivanova T.V., Rudakov V.A., Kovrigina I.V.** Forecasting the number of freight wagons failures during the overhaul period based on statistical assessment ..... 159

**Information technology, management and processing**

- Mukhutdinov A.R., Vakhidova Z.R., Efimov M.G.** Simulation of the cumulation process to determine the thickness and deflection of the segmental cladding of the perforator charge, providing maximum penetration depth ..... 172
- Budanov A.V., Petrov N.V., Nozirzoda Sh.S., Petrova E.D.** Determination of hydraulic characteristics of pipeline fittings using finite element analysis ..... 181

**Требования к статьям, принимаемым к публикации**

Рукописи статей представляются в электронном и распечатанном виде.

Рекомендуемый объем статей 9-12 стр.

1. К статье прилагается:

- акт экспертизы;
- заявка на опубликование (от каждого автора).

2. Статья включает в себя:

- индекс УДК;
- сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, полное название учреждения (кафедры), контактный телефон и E-mail;
- аннотация (реферат) к статье должна быть (на русском и английском языках): информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 180 до 250 слов).
- ключевые слова (5-10 ключевых слов на русском и английском языках);
- библиографический список (необходимо упоминание не менее 18 источников, в том числе 25% на зарубежные источники). Библиографический список к статье оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Текст статьи предоставляется в виде файла с расширением \*.doc – документа, построенного средствами Microsoft Word, и распечаткой на стандартных листах формата А4 (210x297 мм) в две колонки, заверенной подписью авторов.

Статья должна быть **структурирована** (введение, 2 и более пункта разделов, заключение).

3. При наборе статьи в Microsoft Word с учетом формата издания рекомендуются следующие установки:

- параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2,5 см; слева и справа – 1,75 см; табуляция – 1 см; ориентация – книжная;
- шрифт – Times New Roman, размер – 11, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- текст статьи разбивается в две колонки с помощью команды "Форматирование -> Колонки" со следующими параметрами: ширина колонки: 8,5 см, промежуток: 0,5 см.

При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3 с параметрами:

- элементы формулы для греческих букв и символов шрифт Symbol, для остальных элементов – шрифт Times New Roman (использование букв русского алфавита в формуле нежелательно);
- размер символов: обычный – 10 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 11 пт. Все экспликации элементов формул в тексте также необходимо выполнять в виде формул.

Рисунки, вставленные в текст статьи, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм, представлены в виде файла с расширением \*.jpg, \*.tif и распечаткой на стандартных листах формата А4, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров.

В журнал **не принимаются** статьи с таблицами, развернутыми по вертикали (альбомная ориентация), а также имеющими аббревиатуры в названии и аннотации. Если по тексту статьи не делаются ссылки на номера формул, то формулы не нумеруются.

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

Пример оформления статьи представлен на сайте журнала: [ojs.ircgups.ru/index.php/stsam](http://ojs.ircgups.ru/index.php/stsam)

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Редакция оставляет за собой право отклонить статью, не отвечающую указанным требованиям или не прошедшую обязательное рецензирование.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения. Аудитория Г-304. Каимов Евгений Витальевич.

Телефон: 8( 3952) 63-83-74. E-mail: [stsam@ircgups.ru](mailto:stsam@ircgups.ru)

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**MACHINE BUILDING AND THEORETICAL  
ENGINEERING**

## Эффект «застревания» маятника на вращающемся валу механической системы и его аналоги

А.И. Артюнин<sup>1</sup>✉, О.Ю. Суменков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Научно-технологический университет «Сириус», г. Сочи, Российская Федерация

✉artyunin\_ai@irgups.ru

### Резюме

В статье описывается новое явление в механике – эффект «застревания» маятника на вращающемся валу механической системы. Суть его заключается в том, что для маятника, установленного на валу двигателя механической системы с возможностью свободного вращения, в зависимости от момента инерции и трения в его опоре вероятен такой режим движения, когда вал вращается с заданной угловой скоростью, а частота вращения маятника равна одной из собственных частот колебаний механической системы. При моделировании данного процесса с использованием операции осреднения получено в первом приближении уравнение движения маятника, которое наглядно показывает, что его угловая скорость на вращающемся валу механической системы зависит не только от момента инерции и трения в его опоре, а также от собственной частоты колебаний и демпфирования механической системы. Кроме того, в работе рассматриваются явления, которые в некоторой степени можно считать аналогами эффекта «застревания» маятника на вращающемся валу механической системы: колебания механических систем с ограниченной мощностью двигателя; эффект Зоммерфельда; несинхронное движение исполнительных элементов в виде шариков (роликов) в шаровом автобалансиру вертикального ротора. В первых двух случаях эффекта «застревания» маятника аналогии больше носят математический, чем физический характер. Более близким к эффекту «застревания» маятника является несинхронное движение шариков (роликов) в шаровом автобалансиру вертикального ротора.

### Ключевые слова

маятник, автобалансиру, эффект «застревания», угловая скорость, собственная частота колебаний, ограниченное возбуждение, эффект Зоммерфельда, несинхронное движение

### Для цитирования

Артюнин А.И. Эффект «застревания» маятника на вращающемся валу механической системы и его аналоги / А.И. Артюнин, О.Ю. Суменков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 10–21. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).10-21.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 04.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 14.09.2023 г.; принята к публикации: 15.09.2023 г.

## The effect of the «jamming» of the pendulum on the rotating shaft of the mechanical system and its analogues

A.I. Artyunin<sup>1</sup>✉, O.Yu. Sumenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Sirius University of Science and Technology, Sochi, the Russian Federation

✉artyunin\_ai@irgups.ru

### Abstract

The article describes a new phenomenon in mechanics – the effect of «jamming» of a pendulum on a rotating shaft of a mechanical system. The essence of this phenomenon lies in the fact that for a pendulum mounted on the motor shaft of a mechanical system with the possibility of free rotation, depending on the moment of inertia of the pendulum and friction in its support, such a mode of motion is possible when the shaft rotates at a given angular velocity, and the frequency of rotation of the pendulum is equal to one of the natural oscillation frequencies of the mechanical system. When modeling this phenomenon using the averaging operation, the equation of the pendulum motion is obtained in the first approximation, which clearly shows that the angular velocity of the pendulum on the rotating shaft of the mechanical system depends not only on the moment of inertia of the pendulum and friction in its support, but also on the natural frequency of oscillations and damping of the mechanical system. Besides, the article also considers phenomena that to a certain extent can be regarded as analogs of the «jamming» effect of a pendulum on a rotating shaft of a mechanical system, which include: vibrations of mechanical systems with limited engine power; the Sommerfeld effect; non-synchronous movement of actuating elements in the form of balls (rollers) in the ball auto-balancer of a vertical rotor. With the first two phenomena of the «jamming» pendulum effect, the analogies are more mathematical than physical in nature. The non-synchronous movement of the balls (rollers) in the ball auto-balancer of the vertical rotor is closer to the effect of the pendulum «jamming».

**Keywords**

pendulum, auto-balancer, «jamming» effect, angular velocity, natural oscillation frequency, limited excitation, Sommerfeld effect, non-synchronous motion

**For citation**

Artyunin A.I., Sumenkov O.Yu. Effekt «zastrevaniya» маятника на vrashchayushchemsya valu mekhanicheskoi sistemy i ego analogi [The effect of the «jamming» of the pendulum on the rotating shaft of the mechanical system and its analogues]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 10–21. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).10-21.

**Article info**

Received: September 4, 2023; Revised: September 14, 2023; Accepted: September 15, 2023.

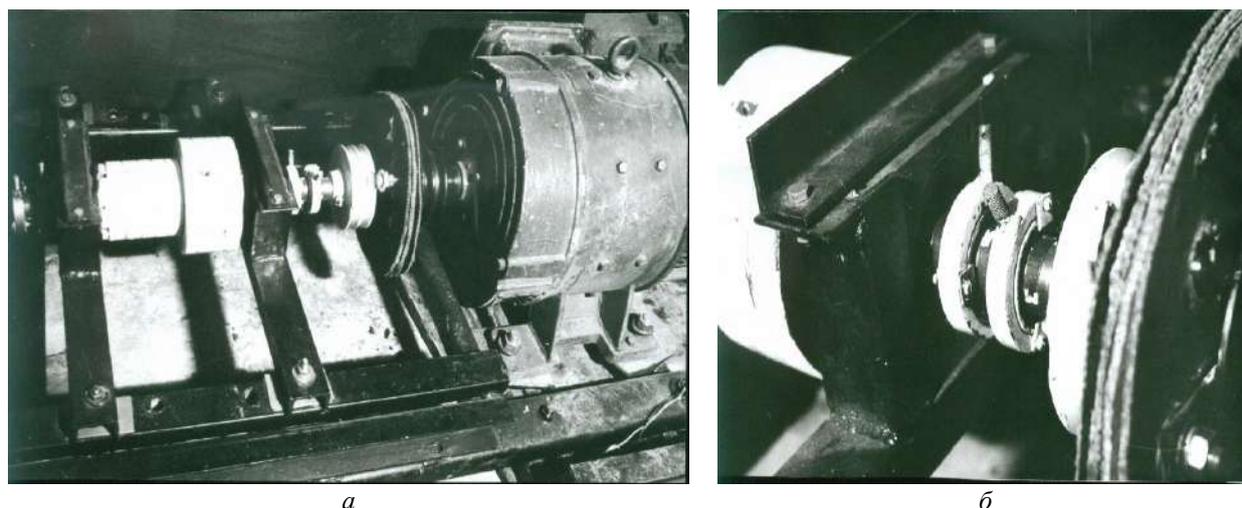
**Введение**

Новое явление в механике – эффект «застревания» маятника на вращающемся валу механической системы – было открыто профессором А.И. Артюниным в 1992 г. при изучении способов автоматической балансировки жесткого ротора на упругих опорах с помощью четырех маятников, установленных на валу ротора с возможностью свободного вращения. [1, 2]. Маятники устанавливались попарно по обоим сторонам ротора как бы имитируя плоскости коррекции при балансировке роторов. При разгоне до рабочей частоты вращения ротор проходил через две критические скорости. На первой критической скорости ротор в основном совершал линейные колебания, а на второй – угловые. В результате экспериментов было установлено, что при определенном соотношении между моментом инерции маятников и трением в их опорах возможен такой режим движения, при котором ротор вращается со своей рабочей частотой вращения (угловой скоростью), а частота вра-

щения маятников совпадает с одной из критических скоростей ротора. Интересно, что когда маятники вращались с угловой скоростью, равной первой критической скорости, то все четыре маятника были направлены в одну сторону, а когда они вращались со скоростью, равной второй критической скорости, на которой в основном преобладают угловые колебания ротора, то маятники в разных парах были направлены противоположно друг другу. И в том, и в другом случае резко возрастает вибрация, колебания ротора носят характер незатухающих двухчастотных биений (рис. 1).

Достоверность экспериментальных данных подтверждена результатами компьютерного моделирования, суть которого заключалась в численном интегрировании дифференциальных уравнений, описывающих движение модели ротора с маятниковым автобалансиром [3, 4].

Описанное явление получило название «эффект “застревания” маятника на вращающемся валу механической системы».



**Рис. 1.** Экспериментальная установка по определению эффекта «застревания»:

*a* – общий вид лабораторного стенда; *б* – маятники

**Fig. 1.** Experimental setup for determining the «jamming» effect:

*a* – general view of the laboratory stand; *b* – pendulums

Похожее явление было обнаружено учеными из Университета Отто фон Герике в Магдебурге в 1999–2004 гг [5–7] при изучении автобалансирующего процесса с помощью шарового балансира. Там проводились исследования процесса автоматической балансировки жесткого статически неуравновешенного ротора на изотропных упругих опорах. Основной деталью автобалансира была цилиндрическая камера, заполненная вязкой жидкостью, с исполнительными элементами в виде шариков (роликов) на кольцевых дорожках. Установлено, что в процессе запуска ротора до рабочей скорости при его прохождении через критическую скорость в некоторых случаях шарики (ролики) не могли разогнаться до рабочей скорости ротора, а совершали несинхронное движение, циркулируя в камере со скоростью, равной критической скорости ротора. Авторы считают, что это явление похоже, но не идентично известному эффекту Зоммерфельда в несбалансированном роторе с ограниченным приводным моментом. Более подробно об исследовании будет сказано далее.

Цель настоящей статьи – сравнение эффекта «застывания» маятника на валу механической системы с явлениями, возникающими при колебаниях механических систем с двигателем ограниченной мощности, с эффектом Зоммерфельда, а также с явлением несинхронного движения шаров в автобалансире.

### Моделирование эффекта «застывания» маятника на вращающемся валу

Для изучения условий возникновения и существования эффекта «застывания» маятника на валу механической системы рассмотрим простую механическую модель (рис. 2).

После процедуры составления дифференциальных уравнений движения модели, используя уравнения Лагранжа второго рода, получим систему из трех дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих движение выбранной механической модели:

$$\begin{aligned} M^* \ddot{x}_1 + b_x \dot{x}_1 + c_x x_1 &= ml \cdot (\dot{\varphi}^2 \sin \varphi - \ddot{\varphi} \cos \varphi); \\ M^* \ddot{y}_1 + b_y \dot{y}_1 + c_y y_1 &= -ml \cdot (\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + \ddot{\varphi} \sin \varphi); \end{aligned} \quad (1)$$

$$ml^2 \ddot{\varphi} + ml^2 \ddot{x}_1 \cos \varphi + ml^2 \ddot{y}_1 \sin \varphi = f(\omega - \dot{\varphi}) - mgl \cos \varphi,$$

где  $M^* = M + m$ , при этом  $M$  – масса корпуса;  $m$ ,  $l$  – масса и длина маятника;  $c_x$ ,  $c_y$  – жесткость опор в горизонтальном и вертикальном направлениях;  $b_x$ ,  $b_y$  – коэффициенты вязкого трения в

горизонтальном и вертикальном направлениях;  $x_1$ ,  $y_1$  – обобщенные координаты корпуса;  $\varphi$  – угол поворота маятника;  $\omega$  – угловая скорость ротора;  $f$  – коэффициент сопротивления относительно движению маятника на вращающемся валу.

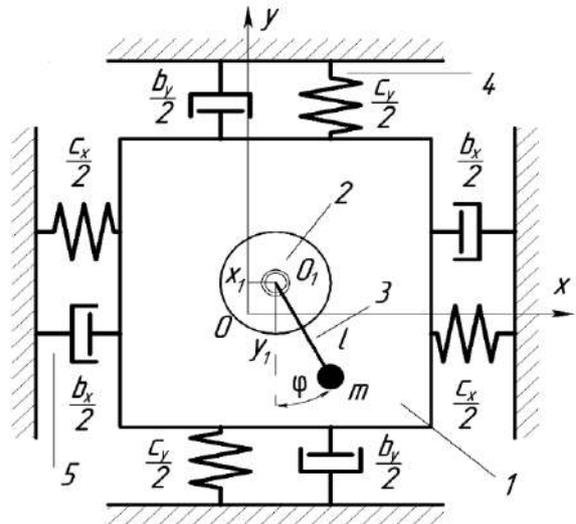


Рис. 2. Механическая система с маятником, вращающимся на валу двигателя в корпусе:

1 – корпус (точка  $O_1$  – центр масс корпуса и ротора); 2 – ротор; 3 – маятник; 4 – невесомые упругие опоры корпуса; 5 – демпферы корпуса

Fig. 2. Mechanical system with a pendulum rotating on the motor shaft in the casing:

1 – casing (point  $O_1$  – the center of mass of the casing and rotor); 2 – rotor; 3 – pendulum; 4 – weightless elastic supports of the housing; 5 – dampers of the casing

Введем обозначения:  $h = ml / M^*$ ;  $2n_x = b_x / M^*$ ;  $2n_y = b_y / M^*$ ;  $k_1^2 = c_x / M^*$ ;  $k_2^2 = c_y / M^*$  и запишем систему уравнений (1) в виде:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2n_x \dot{x}_1 + k_1^2 x_1 &= h \cdot (\dot{\varphi}^2 \sin \varphi - \ddot{\varphi} \cos \varphi); \\ \ddot{y}_1 + 2n_y \dot{y}_1 + k_2^2 y_1 &= -h \cdot (\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + \ddot{\varphi} \sin \varphi); \end{aligned} \quad (2)$$

$$ml^2 \ddot{\varphi} + f(\omega - \dot{\varphi}) = -ml(\ddot{x}_1 \cos \varphi + \ddot{y}_1 \sin \varphi + g \cos \varphi).$$

Для получения уравнения маятника используем вполне адекватные допущения, а именно:

– во-первых, будем считать, что величина углового ускорения маятника намного меньше квадрата его угловой скорости, т.е.  $\ddot{\varphi} \ll \dot{\varphi}^2$ ;

– во-вторых, при выводе уравнения движения маятника в правой части уравнения будем пренебрегать «быстрыми» составляющими движения, применяя операцию усреднения.

Запишем два первых уравнения системы (2):

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2n_1 \dot{x}_1 + k_1^2 x_1 &= h \cdot (\dot{\varphi}^2 \sin \varphi - \ddot{\varphi} \cos \varphi); \\ \ddot{y}_1 + 2n_2 \dot{y}_1 + k_2^2 y_1 &= -h \cdot (\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + \ddot{\varphi} \sin \varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

Так как  $\ddot{\varphi} \ll \dot{\varphi}^2$ , то будем пренебрегать членами с  $\ddot{\varphi}$  в уравнениях и в выражениях частного решения. Уравнения (3) в нашем случае являются порождающими уравнения. Частные решения этих уравнений будем искать в виде  $x = a_1 \cdot \cos \varphi + b_1 \cdot \sin \varphi$ ;  $y = a_2 \cdot \sin \varphi + b_2 \cdot \cos \varphi$ .

Тогда:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -a_1 \dot{\varphi} \sin \varphi + b_1 \dot{\varphi} \cos \varphi; \quad \dot{y} = -a_2 \dot{\varphi} \sin \varphi + b_2 \dot{\varphi} \cos \varphi; \\ \ddot{x} &= -a_1 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi - b_1 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi; \quad \ddot{y} = -a_2 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi - b_2 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi. \end{aligned}$$

Подставляя эти выражения в (3) получим:

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{h \dot{\varphi}^2 2n_y \dot{\varphi}}{(k_2^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_y^2 \dot{\varphi}^2}; \quad b_1 = \frac{h \dot{\varphi}^2 (k_1^2 - \dot{\varphi}^2)}{(k_1^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_x^2 \dot{\varphi}^2}; \\ a_2 &= -\frac{h \dot{\varphi}^2 (k_2^2 - \dot{\varphi}^2)}{(k_2^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_y^2 \dot{\varphi}^2}; \quad b_2 = -\frac{h \dot{\varphi}^2 2n_x \dot{\varphi}}{(k_1^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_x^2 \dot{\varphi}^2}. \end{aligned}$$

Подставляя далее решения порождающего уравнения в третье уравнение системы (2) и усредняя правую часть полученного уравнения, получим следующее уравнение для описания движения маятника:

$$\begin{aligned} ml^2 \ddot{\varphi} + f(\dot{\varphi} - \omega) &= -\frac{mlhn_x \dot{\varphi}^5}{(k_1^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_x^2 \dot{\varphi}^2} - \\ & - \frac{mlhn_y \dot{\varphi}^5}{(k_1^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_y^2 \dot{\varphi}^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Отсюда видно, что угловая скорость маятника, помимо массы и длины маятника, трения в его опоре, зависит также от собственных частот колебаний и демпфирования механической системы.

Численно решая это дифференциальное уравнение, получим закон изменения угловой скорости маятника. Вычисления проводились при следующих исходных данных:  $M = 8$  кг;  $m = 0,02$  кг;  $l = 0,05$  м;  $b_x = 5$  Н·с/м;  $b_y = 50$  Н·с/м;  $f = 10^{-4}$  Н·м/рад;  $c_x = 2 \cdot 10^4$  Н/м;  $c_y = 8 \cdot 10^4$  Н/м. Закон разгона ротора зададим в виде:  $\omega = 30t$  при  $0 \leq t \leq 10$  с и  $\omega = 157$  рад/с при  $t > 10$  с. При этих данных модель имеет две собственные частоты колебаний:  $k_1 = 50$  рад/с;  $k_2 = 100$  рад/с. Результаты численного интегрирования уравнения (4) при изменении только массы маятника приведен на рис. 3.

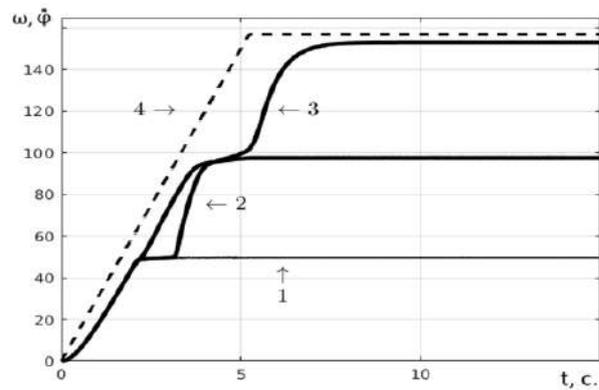


Рис. 3. Законы разгона маятника (кривые 1–3) и ротора (4) при изменении массы маятника  
Fig. 3. The laws of acceleration of the pendulum (curves 1–3) and the rotor (4) when the mass of the pendulum changes

Как видно из рис. 3, при изменении массы маятника его угловая скорость «застревает» и на первой, и на второй собственной частоте (кривые 1 и 2 соответственно), и вращается со скоростью ротора (кривая 3).

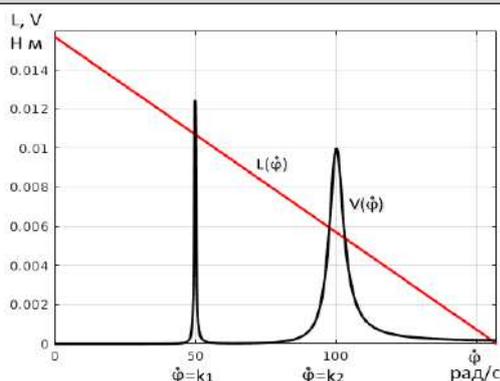
Хотя уравнение (4) описывает в первом приближении нестационарный режим движения маятника с учетом угловой скорости ротора  $\omega$ , рассмотрим случай, когда  $\omega = \text{const}$ , а угловой скорости маятника  $\varphi$  будем придавать постоянные значения от 0 до 200 рад/с, при этом считая  $\ddot{\varphi} = 0$ . Тогда из уравнения (4) получим:

$$\begin{aligned} f(\dot{\varphi} - \omega) + \frac{mlhn_x \dot{\varphi}^5}{(k_1^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_x^2 \dot{\varphi}^2} + \\ + \frac{mlhn_y \dot{\varphi}^5}{(k_1^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_y^2 \dot{\varphi}^2} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Решим это уравнение графически, как это сделано в работах [8, 9]. Введем обозначения и примем условно, что  $L(\dot{\varphi}) = f(\dot{\varphi} - \omega)$  является «движущим моментом», а выражение  $V(\dot{\varphi})$  является «вибрационным моментом»:

$$\begin{aligned} V(\dot{\varphi}) &= \frac{mlhn_x \dot{\varphi}^5}{(k_1^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_x^2 \dot{\varphi}^2} + \\ & + \frac{mlhn_y \dot{\varphi}^5}{(k_1^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_y^2 \dot{\varphi}^2} = 0. \end{aligned}$$

Результаты графического решения уравнения (5) представлены на рис. 4.

Рис. 4. Графики  $L(\dot{\varphi})$  и  $V(\dot{\varphi})$ Fig. 4. Graphics  $L(\dot{\varphi})$  and  $V(\dot{\varphi})$ 

Это графическое представление движущего момента и вибрационного момента показывает, что эффект «застевания» будет иметь место, когда их графики пересекутся. В нашем случае маятник «застевает» при  $\dot{\varphi} = 50$  рад/с и при  $\dot{\varphi} = 100$  рад/с, т. е. при угловых скоростях, равных собственным частотам колебаний механической системы. Этот результат совпадает с результатами численного интегрирования уравнения (4) (см. рис. 3).

### Колебательные системы с ограниченным возбуждением

К аналогам эффекта «застевания» маятника на вращающемся валу можно отнести колебательные системы с ограниченной мощностью двигателя. Исследования о взаимодействии колебательных систем с двигателем ограниченной мощности, когда движение сопровождается взаимным воздействием друг на друга источника энергии и колебательной системы, представляют собой особый раздел теории колебаний. В настоящее время на основании результатов экспериментов и привлечения современных методов анализа колебательных процессов построена теория взаимодействия колебательных систем различного рода (линейных, нелинейных, параметрических, автоколебательных) с источниками энергии различной физической природы (электромеханический, электромагнитный, гидравлический, пневматический, двигатель внутреннего сгорания и др.). основополагающие работы теории систем с ограниченным возбуждением принадлежат В.О. Кононенко [8, 10–12]. Большой вклад в развитие этого научного направления принадлежит ученым Института машиноведения им. А.А. Благоврава [13–20].

Рассмотрим задачу о вынужденных колебаниях линейной системы с учетом источника энергии из монографии В.О. Кононенко [8]. Динамическая схема этой задачи приведена на рис. 5.

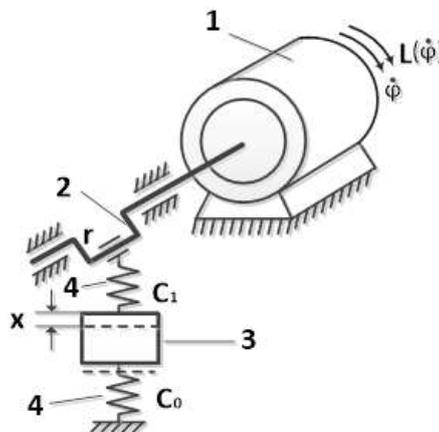


Рис. 5. Схема колебательной системы с источником энергии

Fig. 5. Diagram of an oscillatory system with an energy source

Здесь во время вращения двигателя 1 с известной характеристикой  $L(\dot{\varphi})$  кривошип 2, радиус которого равен  $r$ , перемещает упругое тело 3 массой  $m$ , деформируя упругую связь 4 жесткостью  $c_1$ , благодаря чему создается сила, равная  $c_1 r \cdot \sin \varphi$ , и ее момент  $-c_1 r \cdot \sin \varphi \cdot r \cdot \cos \varphi$ . Составляя далее выражения для кинетической и потенциальной энергий и применяя уравнения Лагранжа второго рода, получим уравнения движения:

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + cx = c_1 r \cdot \sin \varphi, \quad (6)$$

$$I\ddot{\varphi} + H(\dot{\varphi}) = L(\dot{\varphi}) + c_1 r(x - r \sin \varphi) \cdot \cos \varphi,$$

где  $m$  — масса колебательной системы;  $c = c_0 + c_1$  — жесткость колебательной системы;  $I$  — момент инерции вращающихся масс. В уравнениях учтены:

– сила сопротивления колебательному движению  $R = \beta \dot{x}$ ;

– момент сопротивления вращению ротора  $H(\dot{\varphi})$ ;

– движущий момент источника энергии  $L(\dot{\varphi})$  как характеристика двигателя.

Ожидая наиболее активное взаимодействие колебательной системы с источником энергии, будем рассматривать колебания в области основного резонанса и полагать, что разность между частотой собственных колебаний

и частотой возмущающей силы мала. Будем также считать малыми возмущающую силу  $c_1 r \cdot \sin \varphi$  и силу сопротивления  $R = \beta \dot{x}$ , а режим движения близким к стационарному. Тогда уравнения (6) можно записать в форме, содержащей малый параметр  $\varepsilon$ :

$$\ddot{x} + \omega^2 x = \varepsilon(q \sin \varphi - h \dot{x}),$$

$$\ddot{\varphi} = \varepsilon[M_1(\dot{\varphi}) + q_1(x - r \sin \varphi) \cdot \cos \varphi],$$

где  $\omega^2 = c/m$ ,  $\varepsilon q = c_1 r/m$ ,  $\varepsilon q_1 = c_1 r/I$ ,  $\varepsilon h = \beta/m$ ,  $\varepsilon M_1(\dot{\varphi}) = (1/I) \cdot [L(\dot{\varphi}) - H(\dot{\varphi})]$ .

Приводя далее эту систему уравнений к стандартной форме и применяя метод теории возмущений Боголюбова, получаем в первом приближении для стационарных режимов колебаний амплитуду –  $a$ , фазу –  $\alpha$  и уравнение частоты вынужденных колебаний  $\Omega$ :

$$a = \frac{c_1 r}{m \sqrt{4\omega^2(\omega - \Omega)^2 + \beta^2 \omega^2 / m}};$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2m}{\beta}(\omega - \Omega);$$

$$L(\Omega) = H(\Omega) - \frac{1}{2} \beta \omega a^2.$$

Решение уравнения (7) можно представить в графической форме (рис. 6).

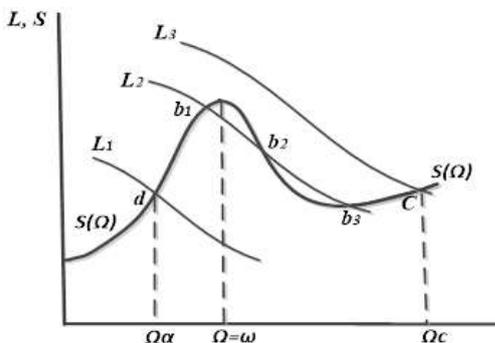


Рис. 6. Графики  $S$  и  $L$   
Fig. 6. Graphics  $S$  and  $L$

На рис. 6 изображен график функции:

$$S(\Omega) = H(\Omega) + \frac{1}{2} \beta \omega a^2 =$$

$$= H(\Omega) + \frac{\beta}{2} \frac{c_1 r}{4\omega^2(\omega - \Omega)^2 + \beta^2 \omega^2 / m^2}$$

и график  $L(\Omega)$  – характеристики источника энергии. Сравнивая этот график с рис. 4, мы можем провести аналогию между эффектом «застывания» маятника на вращающемся валу и колебаниями систем с ограниченным возбуждением в части математического описания.

### Эффект Зоммерфельда

Эффект Зоммерфельда – частный случай колебательных систем с ограниченным возбуждением, и вместе с тем это явление послужило началом создания нового раздела теории колебаний – «Колебательные системы с ограниченным возбуждением». Эффектом Зоммерфельда ученые назвали результаты одного из экспериментов выдающегося ученого-физика Арнольда Зоммерфельда.

Суть эксперимента заключалась в наблюдении за изменением угловой скорости электродвигателя, на валу которого была создана искусственная неуравновешенность, при увеличении тока на обмотках электродвигателя. Оказалось, что при достижении некоторого значения угловая скорость почти не изменялась, несмотря на увеличение мощности двигателя, а потом все же при увеличении мощности двигателя совершала резкий скачок. При этом наблюдались колебания стола, на котором был установлен электродвигатель.

Ученый справедливо предположил, что подаваемая мощность поглощалась колебаниями и подсчитал собственные частоты колебаний стола на четырех ножках. Полученные значения собственных частот почти совпали с значениями «застывшей» угловой скорости [21, 22]. Таким образом, А. Зоммерфельд экспериментально открыл эффект взаимодействия работы двигателя и колебательной системы. Разработка теории, описывающей это явление, произошла значительно позже [9, 23–26].

Следуя работе И.И. Блехмана [9], рассмотрим механическую систему для моделирования эффекта Зоммерфельда (рис. 7).

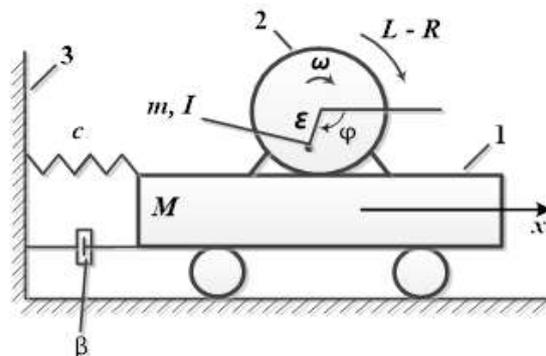


Рис. 7. Механическая система для моделирования эффекта Зоммерфельда  
Fig. 7. A mechanical system for simulating the Sommerfeld effect

Здесь на жесткой платформе 1 установлен неуравновешенный ротор 2, приводимый во вращение от электродвигателя. Статический эксцентриситет массы ротора обозначим  $\varepsilon$ . Платформа может перемещаться вдоль фиксированного направления (по оси  $x$ ). С неподвижным основанием 3 она связана упругими элементами жесткостью  $c$  и демпфирующим элементом с коэффициентом вязкого трения  $\beta$ .

За обобщенные координаты выберем  $\varphi$  – угол поворота двигателя и  $x$  – смещение платформы.

При выбранных обобщенных координатах уравнения движения системы имеют вид:

$$I\ddot{\varphi} = L(\dot{\varphi}) - R(\dot{\varphi}) + m\dot{x}\varepsilon \sin \varphi,$$

$$M\ddot{x} + \beta\dot{x} + cx = m\varepsilon(\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + \ddot{\varphi} \sin \varphi).$$

Здесь  $M$  – масса платформы;  $m$  – масса ротора;  $M^* = M + m$  – масса системы;  $I$  – момент инерции ротора;  $L(\dot{\varphi})$  – вращающий момент двигателя (статическая характеристика двигателя);  $R(\dot{\varphi})$  – момент сил сопротивления. Влияние силы тяжести на ротор и динамику электродвигателя учитывать не будем.

В качестве исходного приближения принимается  $\varphi = \varphi_1 = \omega t$ ;  $x = x_1 = P \sin \omega t + Q \cos \omega t$ , где  $\omega = \omega(t)$ ,  $P$  и  $Q$  – медленно меняющиеся, а  $x_1$  – быстро меняющиеся функции времени. Далее используя метод прямого разделения движений, было получено следующее уравнение для частоты вращения двигателя:

$$I\dot{\omega} = L(\omega) - R(\omega) + V(\omega). \quad (8)$$

Здесь

$$V(\omega) = m\varepsilon \langle \ddot{x}_1 \sin \omega t \rangle = -\frac{(m\varepsilon\omega)^2}{M^*} \frac{m\varepsilon\omega^2}{(\omega^2 - p^2)^2 + 4n^2\omega^2} = -n\omega M^* A^2,$$

где  $V(\omega)$  – вибрационный момент, представляющий дополнительную нагрузку на ротор, обусловленную колебаниями платформы, на которую он установлен. В этом выражении угловые скобки указывают на осреднение за период  $T = 2\pi$  по «быстрому» времени  $\tau = \omega t$  и приняты обозначения:

$$p^2 = c / M^*; 2n = \beta / M^*; A = \frac{m\varepsilon\omega^2}{\sqrt{(\omega^2 - p^2)^2 + 4n^2\omega^2}}.$$

Здесь  $A$  представляет собой амплитуду колебаний платформы, описываемую уравнением:

$$M^* \ddot{x} + \beta\dot{x} + cx = m\varepsilon\omega^2 \sin \omega t.$$

Амплитуда  $A$  связана с  $P$  и  $Q$  соотношением  $A = \sqrt{P^2 + Q^2}$ , причем

$$P = \frac{m\varepsilon\omega^2}{M^*} \frac{2n\omega}{(\omega^2 - p^2)^2 + 4n^2\omega^2};$$

$$Q = \frac{m\varepsilon\omega^2}{M^*} \frac{p^2 - \omega^2}{(\omega^2 - p^2)^2 + 4n^2\omega^2}.$$

Решение уравнения (8) представляется в графической форме (рис. 8).

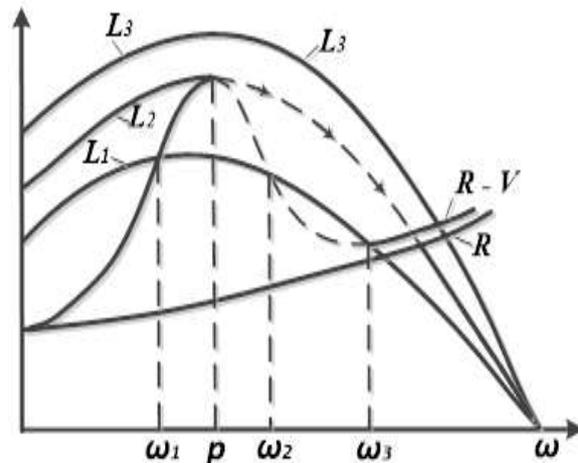


Рис. 8. Графическое решение уравнения для частоты вращения двигателя

Fig. 8. Graphical solution of the equation for engine speed

Уравнение (8) для стационарных значений  $\omega = \text{const}$  имеет либо три решения  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ , где кривые  $L$  соответствуют статическим характеристикам электродвигателей. Решение при  $\omega_1 < p$  является дорезонансным, при  $\omega_2 > p$  – послерезонансным, а при  $\omega_3 \gg p$  – далеко послерезонансным. При этом решения  $\omega_1$  и  $\omega_3$  являются устойчивыми, а  $\omega_2$  – неустойчивым. Характеристике  $L_1$  отвечает «застревание» системы вблизи резонанса на частоте  $\omega_1$  (эффект Зоммерфельда), а характеристике  $L_3$  более мощного двигателя – выход на нормальный рабочий режим. Характеристике  $L_2$  соответствует скачкообразный переход от резонансного в далеко зарезонансный режим. Сравнивая график на рис. 8 с графиком на рис. 4 можно увидеть аналогию эффекта «застревания» маятника на вращающемся валу механической системы и эффекта Зоммерфельда.

### Несинхронное движение шаров в камере автобалансира

Несинхронное движение шариков (роликов) в автобалансирующем устройстве было обнаружено и исследовано учеными из Университета Отто фон Герике в Магдебурге в 1999–2004 гг. [5–7]. В работах приведены результаты исследований процесса автоматической балансировки жесткого статически неуравновешенного ротора на изотропных упругих опорах. Основной деталью (частью) автобалансира являлась цилиндрическая камера, заполненная вязкой жидкостью, с исполнительными элементами в виде шариков (роликов) на кольцевых дорожках. Было установлено, что в процессе запуска ротора до рабочей скорости при его прохождении через критическую скорость (автобалансировка возможна только в закритической области) в некоторых случаях шарики (ролики) не могли разогнаться до рабочей скорости ротора для его уравновешивания, а совершали несинхронное движение, циркулируя в камере со угловой скоростью, равной критической скорости ротора. Авторы считают, что это явление похоже, но не идентично известному эффекту Зоммерфельда в несбалансированном роторе с ограниченным при-

водным моментом. Рассмотрим модель ротора с автобалансирующим устройством из работы [7] (рис. 9).

В плоскости рисунка изображен ротор массы  $m$  и моментом инерции  $I$  относительно оси перпендикулярной плоскости рисунка, имеющий три обобщенные координаты  $x$ ,  $y$  и  $\varphi_0$ . Автобалансир представляет собой закрытую цилиндрическую полость с вязкой жидкостью, в которой находятся два шарика (ролика) массами  $m_1$ ,  $m_2$  и угловыми координатами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ . Неуравновешенность ротора изображалась в виде точечной массы  $m_0$  с угловой координатой  $\varphi_0$ .

Для данной модели была составлена система дифференциальных уравнений, позволяющая изучить случаи, в которых может наблюдаться несинхронное движение шариков (роликов):

- движение ротора с дисбалансом без компенсирующих элементов (шариков, роликов);
- движение ротора без дисбаланса с одним компенсирующим элементом;
- движение ротора без дисбаланса с двумя компенсирующими элементами;
- движение ротора с дисбалансом и двумя компенсирующими элементами.

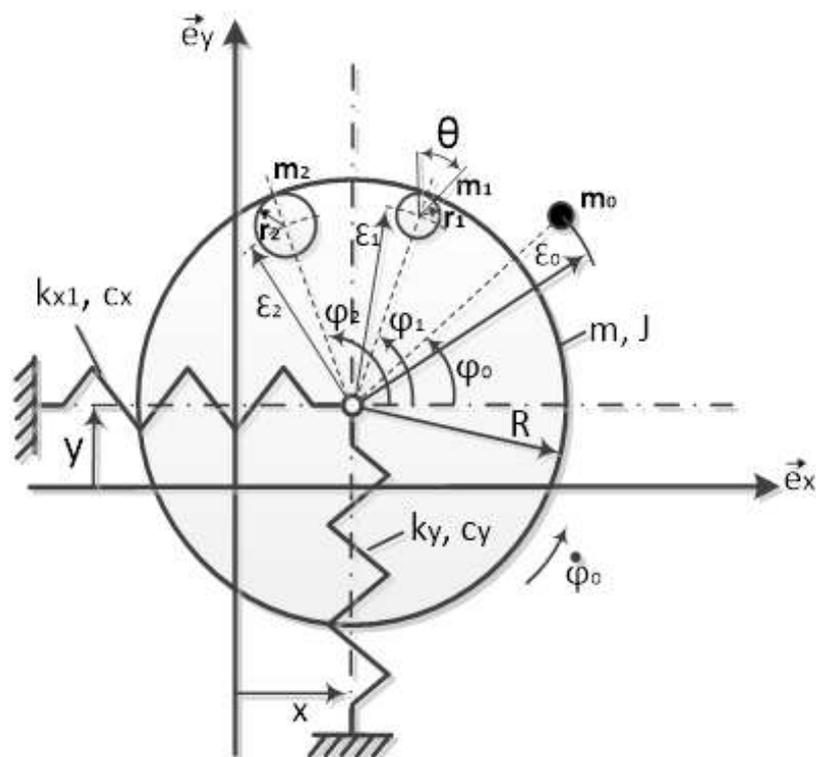


Рис. 9. Модель ротора с шаровым автобалансиrom в плоскости  
Fig. 9. A model of a rotor with a ball auto-balancer in the plane

Рассмотрим случай движения ротора без дисбаланса с одним компенсирующим шариком (роликом). Уравнение движения модели в этом случае в обозначениях авторов имеет вид:

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= m_1 \varepsilon_1 (\dot{\varphi}_1^2 \cos \varphi_1 + \ddot{\varphi}_1 \sin \varphi_1); \\ M\ddot{y} + c\dot{y} + ky &= m_1 \varepsilon_1 (\dot{\varphi}_1^2 \sin \varphi_1 + \ddot{\varphi}_1 \cos \varphi_1); \end{aligned} \quad (9)$$

$$I_{00}\ddot{\varphi}_0 - I_{01}\ddot{\varphi}_1 + \beta_0\dot{\varphi}_0 - \beta_1\dot{\varphi}_1 = L_0;$$

$$I_{01}\ddot{\varphi}_0 + I_{11}\ddot{\varphi}_1 - \beta_1\dot{\varphi}_0 + \beta_1\dot{\varphi}_1 + B_1 = 0,$$

где  $B_1 = -m_1 \varepsilon_1 (\ddot{x} \sin \varphi_1 + \ddot{y} \cos \varphi_1)$ .

Здесь  $M$  – масса ротора с шариком (роликом);  $c$  – коэффициент сопротивления движению ротора по направлениям  $x$ ,  $y$ ;  $k$  – коэффициент жесткости упругих опор по этим направлениям;  $I_{00}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{11}$  – моменты инерции ротора и шарика (ролика);  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  – коэффициенты сопротивления вращению ротора и движения шарика (ролика);  $L_0$  – постоянная составляющая крутящего момента ротора;  $\varepsilon_1$  – расстояние между центрами ротора и шарика (ролика).

В первом приближении  $\dot{\varphi}_0 = \omega_0 = \text{const}$ ;  $\dot{\varphi}_1 = \omega_1 = \text{const}$ ;  $\varphi_1 = \omega_1 t$ ;  $\Omega = L_0 / \beta_0 = \text{const}$ .

Тогда первые два уравнения системы (9) примут вид:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_1 \varepsilon_1 \omega_1^2 \cos \omega_1 t;$$

$$M\ddot{y} + c\dot{y} + ky = m_1 \varepsilon_1 \omega_1^2 \sin \omega_1 t,$$

а их решением будут  $x = A \cdot \cos(\omega_1 t - \gamma)$ ,  $y = A \cdot \sin(\omega_1 t - \gamma)$ , где

$$A = \frac{m_1 \varepsilon_1 \omega_1^2}{\sqrt{M^2 (\omega_{\text{кр}}^2 - \omega_1^2)^2 + c^2 \omega_1^2}};$$

$$\gamma = \arctg \frac{c \omega_1}{M (\omega_{\text{кр}}^2 - \omega_1^2)}; \quad \omega_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{k}{M}}.$$

Тогда  $B = m_1 \varepsilon_1 \omega_1^2 A \sin \gamma$ . Подставляя  $x$  и  $y$  в четвертое выражение системы уравнений (9) получим зависимость угловой скорости шарика (ролика) от угловой скорости ротора:

$$\beta_1 \omega_1 = V_1 + \beta_1 \omega_0, \quad (10)$$

где  $A = \frac{m_1^2 \varepsilon_1^2 c \omega_1^5}{M^2 (\omega_{\text{кр}}^2 - \omega_1^2)^2 + c^2 \omega_1^2}$  является

вибрационным моментом.

На основе уравнения (10) может быть графически построена функция зависимости  $\omega_1$  от  $\omega_0$  (рис. 10).

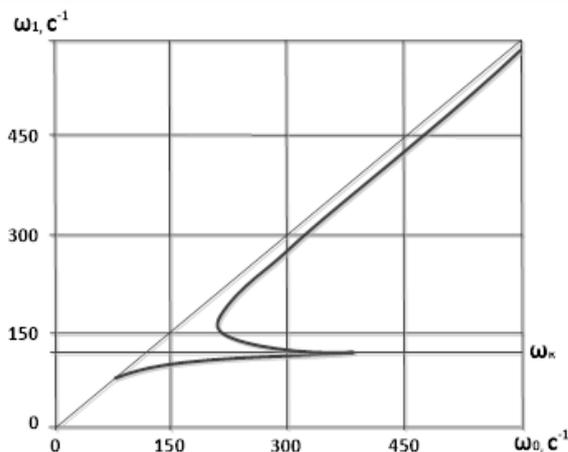


Рис. 10. График зависимости  $\omega_1$  от  $\omega_0$   
Fig. 10. Graph of the dependence of  $\omega_1$  on  $\omega_0$

Как видно из рис. 10, угловая скорость шарика (ролика) при приближении ее значения к значению критической скорости на определенный период времени принимает значение критической скорости, а потом, при увеличении угловой скорости ротора, угловая скорость шарика (ролика) резко возрастает и он совершает движения вместе с ротором, обеспечивая компенсацию его неуравновешенности. Таким образом, это можно характеризовать как аналог эффекта «застревания» маятника на вращающемся валу.

Позже, в 2012 г., подобное явление в шаровом автобалансире было исследовано китайскими учеными [27].

## Заключение

Проведено моделирование эффекта «застревания» маятника на вращающемся валу. С использованием разумных допущений и операции осреднения получено приближенное уравнение движения маятника, которое наглядно показывает, что его угловая скорость на вращающемся валу механической системы зависит не только от момента инерции маятника и трения в его опоре, но и собственной частоты колебаний и демпфирования механической системы. Это при определенных условиях является причиной того, что угловая скорость маятника равна одной из частот собственных колебаний механической системы. Аналогами эффекта «застревания» маятника в большей или меньшей степени можно считать явления, которые возникают при колебаниях механических систем с ограниченной мощностью двигателя, эффект Зоммерфельда и явление несинхронного движения шариков (ро-

ликов) в шаровом автобалансире. В первых двух случаях аналогии носят больше математический характер, чем физический. Самым близким к эффекту «застревания» маятника является эффект несинхронного движения шариков (роликов) в автобалансире, тем более, что тот и другой обнаружены при изучении автоматической

балансировки ротора. Однако «застревание» маятника на вращающемся валу было обнаружено в России в 1992 г., а эффект несинхронного движения шариков в Магдебурге в 1999–2000 гг., т.е. приоритет открытия эффекта «застревания» маятника остается за Российской Федерацией.

### Список литературы

1. Артюнин А.И., Жаров В.П. Новый эффект в нелинейной механике // Механика деформированного твердого тела : Межвуз. сб. науч. тр. Ростов-на-Дону, 1992. С. 3–11.
2. Артюнин А.И. Исследование движения ротора с автобалансиром // Изв. вузов. Машиностроение. 1993. № 1. С. 7–15.
3. Артюнин А.И. Эффект «застревания» и особенности движения ротора с маятниковыми автобалансирами // Наука и образование. 2013. № 8. С. 443–454.
4. Елисеев С.В., Артюнин А.И. Механико-математическое моделирование эффекта застревания маятников на вращающемся роторе // Вестн. Белорус. гос. ун-та трансп. : наука и транспорт. 2016. № 2 (33). С. 172–175.
5. Zum Sommerfeld effekt beim selbsttätigen Auswuchten einer Ebene / B. Ryzhik, T. Amer, H. Duckstein u.a. // Technische Mechanik. 2001. Bd. 21. Heft 4. S. 297–312.
6. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Single-Plane Auto-Balancing of Rigid Rotors // Technische Mechanik. 2004. Bd. 24. Heft 1. S. 1–24.
7. Ryzhik B., Sperling L., Duckstein H. Non-synchronous Motions Near Critical Speeds in a Single-plane Autobalancing Device // Technische Mechanik. 2004. Bd. 24. Heft 1. S. 25–36.
8. Кононенко В.О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением. М. : Наука, 1964. 254 с.
9. Блехман И.И. Вибрационная механика. М. : Физматлит, 1994. 394 с.
10. Кононенко В.О., Фролов К.В. О взаимодействии нелинейной колебательной системы с источником энергии // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1961. № 5. С. 69–76.
11. Кононенко В.О. Вопросы динамического взаимодействия машины с источником энергии // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1975. № 5. С. 19–30.
12. Кононенко В.О. Нелинейные колебания механических систем. Киев : Наук. думка, 1980. 382 с.
13. Фролов К.В. Об автоколебаниях с учетом свойств источника энергии // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1962. № 1. С. 83–86.
14. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем. М. : Машиностроение, 1979. 351 с.
15. Алифов А.А., Глухарев К.К., Фролов К.В. К теории колебаний элементов машин, содержащих источники энергии ограниченной мощности // Теория механизмов и машин : материалы I Всесоюз. съезда. Алматы, 1977. С. 84.
16. Фролов К.В. Нелинейные резонансные эффекты в механических системах при учете свойств источника энергии // Вестник АН СССР. 1987. № 10. С. 9–20.
17. Алифов А.А., Фролов К.В. Взаимодействие нелинейных колебательных систем с источником энергии. М. : Наука. 1985. 327 с.
18. Фролов К.В. Избранные труды : в 2 т. Т. 1. Вибрация и техника. М. : Наука, 2007. 351 с.
19. Краснополская Т.С., Швец А.Ю. Регулярная и хаотическая динамика систем с ограниченным возбуждением. М. ; Ижевск : НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2008. 280 с.
20. Гуськов А.М., Пановко Г.Я. Нелинейные эффекты при колебаниях линейных систем с центробежным возбудителем ограниченной мощности // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 6. С. 115–125.
21. Sommerfeld A. Beitrage zum dynamischen Ausbau der Festigkeitslehr // Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. 1902. Band 46. S. 391–394.
22. Sommerfeld A. Naturwissenschaftliche Ergebnisse der neueren technischen Mechanik // Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. 1904. Bd. 48. S. 631–636.
23. Диментберг М.Ф., Фролов К.В. Эффект Зоммерфельда в системе со случайно изменяющейся собственной частотой // Доклады АН СССР. 1966. Т. 171. № 6. С. 1293–1296.
24. Ганиев Р.Ф., Краснополская Т.С. Научное наследие В.О. Кононенко: эффект Зоммерфельда-Кононенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 8. С. 3–15.
25. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. М. : Наука, 1971. 894 с.
26. Блехман И.И., Индейцев Д.А., Фрадков А.Л. Медленные движения в системах с инерциальным возбуждением колебаний // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 1. С. 25–32.
27. Lu C.-J., Tien M.-H. Pure-rotary periodic motions of a planar two-ball auto-balancer system // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012. Vol. 32. P. 251–268.

### References

1. Artyunin A.I., Zharov V.P. Novyi effekt v nelineinoi mekhanike [A new effect in nonlinear mechanics]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Mekhanika deformirovannogo tverdogo tela»* [Interuniversity proceedings «Mechanics of a deformed solid»]. Rostov-on-Don, 1992, pp. 3–11.

2. Artyunin A.I. Issledovanie dvizheniya rotora s avtobalansom [Investigation of rotor motion with an auto-balancer]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Bulletins of highest educational organizations. Mechanical engineering], 1993, no. 1, pp. 7–15.
3. Artyunin A.I. Effekt «zastrevaniya» i osobennosti dvizheniya rotora s mayatnikovymi avtobalansirami [The effect of «jamming» and the features of the rotor movement with pendulum auto-balancers]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2013, no. 8, pp. 443–454.
4. Eliseev S.V., Artyunin A.I. Mekhaniko-matematicheskoe modelirovanie effekta zastrevaniya mayatnikov na vrashchayushchemsya rotore [Mechanical and mathematical modeling of the effect of pendulum jamming on a rotating rotor]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport], 2016, no. 2 (33), pp. 172–175.
5. Ryzhik B., Amer T., Duckstein H., L. Sperling. Zum Sommerfeldeffekt beim selbsttätigen Auswuchten einer Ebene. *Technische Mechanik*. 2001. Band 21. Heft 4. Pp. 297–312.
6. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Single-Plane Auto-Balancing of Rigid Rotors. *Technische Mechanik*. 2004. Band 24. Heft 1. Pp. 1–24.
7. Ryzhik B., Sperling L., Duckstein H. Non-synchronous Motions Near Critical Speeds in a Single-plane Autobalancing Device. *Technische Mechanik*. 2004. Band 24. Heft 1. Pp. 25–36.
8. Kononenko V.O. Kolebatel'nye sistemy s ogranichennym vzbuzhdeniem [Oscillatory systems with limited excitation]. Moscow: Nauka Publ., 1964. 254 p.
9. Blekhan I.I. Vibratsionnaya mekhanika [Vibration mechanics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1994. 394 p.
10. Kononenko V.O., Frolov K.V. O vzaimodeistvii nelineinoi kolebatel'noi sistemy s istochnikom energii [On the interaction of a nonlinear oscillatory system with an energy source]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk. Mekhanika i mashinostroenie* [Bulletins of the USSR Academy of Sciences. Department of Technical Sciences. Mechanics and mechanical engineering], 1961, no. 5, pp. 69–76.
11. Kononenko V.O. Voprosy dinamicheskogo vzaimodeistviya mashiny s istochnikom energii [Questions of dynamic interaction of a machine with an energy source]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletins of the USSR Academy of Sciences. Solid state mechanics], 1975, no. 5, pp. 19–30.
12. Kononenko V.O. Nelineinye kolebaniya mekhanicheskikh sistem [Nonlinear oscillations of mechanical systems]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1980. 382 p.
13. Frolov K.V. Ob avtokolebaniyakh s uchetom svoystv istochnika energii [On self-oscillations taking into account the properties of an energy source]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk. Mekhanika i mashinostroenie* [Bulletins of the USSR Academy of Sciences. Department of Technical Sciences. Mechanics and mechanical engineering], 1962, no. 1, pp. 83–86.
14. Vibratsii v tekhnike (spravochnik v 6 t). T. 2. Kolebaniya nelineinykh mekhanicheskikh sistem [Vibrations in engineering (handbook in 6 vol.). Vol. 2. Vibrations of nonlinear mechanical systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 351 p.
15. Alifov A.A., Glukharev K.K., Frolov K.V. K teorii kolebaniy elementov mashin, sodержashchikh istochniki energii ogranichennoi moshchnosti [On the theory of vibrations of elements of machines containing energy sources of limited power]. *Materialy I Vsesoyuznogo s'ezda «Teoriya mekhanizmov i mashin»* [Proceedings of the I All-Union Congress «Theory of mechanisms and machines»]. Almaty, 1977. P. 84.
16. Frolov K.V. Nelineinye rezonansnye efekty v mekhanicheskikh sistemakh pri uchete svoystv istochnika energii [Nonlinear resonance effects in mechanical systems taking into account the properties of an energy source]. *Vestnik Akademii nauk SSSR* [Bulletin of the USSR Academy of Sciences], 1987, no. 10, pp. 9–20.
17. Alifov A.A., Frolov K.V. Vzaimodeistvie nelineinykh kolebatel'nykh sistem s istochnikom energii [Interaction of nonlinear oscillatory systems with an energy source]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 327 p.
18. Frolov K.V. Izbrannye trudy (v 2 t). T. 1. Vibratsiya i tekhnika [Selected works (in 2 volumes). Vol. 1. Vibration and technology]. Moscow: Nauka Publ., 2007. 351 p.
19. Krasnopol'skaya T.S., Shvets A.Yu. Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika sistem s ogranichennym vzbuzhdeniem [Regular and chaotic dynamics of systems with limited excitation]. Moscow; Izhevsk: Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika Publ., Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2008. 280 p.
20. Gus'kov A.M., Panovko G.Ya. Nelineinye efekty pri kolebaniyakh lineinykh sistem s tsentrobezhnym vzbuditelem ogranichennoi moshchnosti [Nonlinear effects during oscillations of linear systems with a centrifugal exciter of limited power]. *Vestnik MGTU im. N.E.Baumana. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. The series «Mechanical Engineering»], 2012, no. 6, pp. 115–125.
21. Sommerfeld A. Beitrage zum dynamischen Ausbau der Festigkeitslehr. *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*. 1902. Band 46. Pp. 391–394.
22. Sommerfeld A. Naturwissenschaftliche Ergebnisse der neueren technishen Mechanik. *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*. 1904. Band 48. Pp. 631–636.
23. Dimentberg M.F., Frolov K.V. Effekt Zommerfel'da v sisteme so sluchaino izmenyayushcheysya sobstvennoi chastotoi [Sommerfeld effect in a system with randomly varying natural frequency]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1966, vol. 171, no. 6, pp. 1293–1296.
24. Ganiev R.F., Krasnopol'skaya T.S. Nauchnoe nasledie V.O. Kononenko: effekt Zommerfel'da-Kononenko [V.O. Kononenko's scientific legacy: Sommerfeld-Kononenko effect]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability], 2018, no. 8, pp. 3–15.
25. Blekhan I.I. Sinkhronizatsiya dinamicheskikh sistem [Synchronization of dynamic systems]. Moscow: Nauka Publ., 1971. 894 p.

26. Blekhman I.I., Indeitsev D.A., Fradkov A.L. Medlennye dvizheniya v sistemakh s inertial'nym vzbuzhdeniem kolebaniy [Slow movements in systems with inertial excitation of oscillations]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and reliability of machines], 2008, no. 1, pp. 25–32.

27. Lu C.-J., Tien M.-H. Pure-rotary periodic motions of a planar two-ball auto-balancer system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, vol. 32, pp. 251–268.

#### **Информация об авторах**

**Артюнин Анатолий Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: artyunin\_ai@irgups.ru.

**Суменков Олег Юрьевич**, аспирант научного центра информационных технологий и искусственного интеллекта, Научно-технологический университет Сириус, г. Сочи; e-mail: artunina2107@yandex.ru.

#### **Information about the authors**

**Anatolii I. Artyunin**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: artyunin\_ai@irgups.ru.

**Oleg Yu. Sumenkov**, Ph.D. student of the Scientific Center of Information Technologies and Artificial Intelligence, Sirius University of Science and Technology, Sochi; e-mail: artunina2107@yandex.ru.

## Определение уровня остаточных напряжений методом компьютерного моделирования при точении жаропрочных материалов

Л.Р. Кильметова✉

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Российская Федерация

✉kilmetovalr@gmail.com

### Резюме

Одним из факторов качества обработанной поверхности являются остаточные напряжения, возникающие после механической обработки, которые имеют важное значение для долговечности и надежности конструкций и изделий. В связи с этим актуальность определения таких остаточных напряжений становится все более важной задачей. Остаточные напряжения необходимо учитывать при проектировании и изготовлении изделий. Определение уровня напряжений и их распределения в материале помогает предотвратить возникновение проблем и повреждений при эксплуатации продукции, а также оптимизировать процессы обработки и повысить ее качество и надежность. Существуют различные методы для измерения и снятия остаточных напряжений, такие как механический, рентгеноструктурный, акустический и др. Все они имеют свои достоинства и недостатки, и выбор метода зависит от конкретных требований и условий. Однако отсутствует способ, позволяющий на стадии технологического проектирования изделия прогнозировать допустимый уровень остаточных напряжений. В данной статье предложена и описана методика, основанная на использовании компьютерного моделирования, которая помогает прогнозировать и контролировать уровень и величину остаточных напряжений еще на стадии технологической подготовки производства. Применение компьютерного моделирования совместно с данными о материалах и процессе обработки дает возможность точно настроить параметры обработки, чтобы достичь желаемого уровня и знака остаточных напряжений, что повысит эффективность производства и снизит вероятность дефектов продукции.

### Ключевые слова

остаточные напряжения, режимы резания, компьютерная модель, жаропрочные материалы, деформация, разрушение

### Для цитирования

Кильметова Л.Р. Определение уровня остаточных напряжений методом компьютерного моделирования при точении жаропрочных материалов / Л.Р. Кильметова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 22–33. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).22-33.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 25.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 27.09.2023 г.; принята к публикации: 27.09.2023 г.

### Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упругости деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

## Determining the level of residual stresses by computer simulation in turning heat-resistant materials

L.R. Kil'metova✉

Ufa University of Science and Technology, Ufa, the Russian Federation

✉kilmetovalr@gmail.com

### Abstract

One of the factors of the quality of the machined surface is the residual stresses arising after machining, which are important for the durability and reliability of structures and products. In this regard, the relevance of determining residual stresses, especially after machining, is becoming an increasingly important task. Residual stresses must be taken into account when designing and manufacturing products. Measuring residual stresses allows to determine their level and distribution in the material, which helps prevent problems and damage during operation, it also allows to optimize processing processes and improve the quality and reliability of products. There are various methods for measuring and relieving residual stresses, such as mechanical, X-ray diffraction, acoustic and others. They all have their advantages and disadvantages, and the choice of method depends on the specific requirements and conditions. However, there is no way to predict the required level of residual stresses at the stage of technological design of a product. This article proposes and describes a technique based on the use of computer modeling, which allows to predict and control the level and magnitude of residual stresses even at the stage of technological preparation for production. The use of computer simulation in conjunction with material and processing data makes it possible to fine-tune processing parameters

to achieve the desired level and sign of residual stresses, which will increase production efficiency and reduce the likelihood of product defects.

### Keywords

residual stresses, cutting conditions, computer model, heat-resistant materials, deformation, destruction

### For citation

Kil'metova L.R. Opredelenie urovnya ostatochnykh napryazhenii metodom komp'yuternogo modelirovaniya pri tochenii zharo-prochnykh materialov [Determining the level of residual stresses by computer simulation in turning heat-resistant materials]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 22–33. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).22-33.

### Article Info

Received: September 25, 2023; Revised: September 27, 2023; Accepted: September 27, 2023.

### Acknowledgement

The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State task «Research of physico-chemical and mechanical processes in the shaping and hardening of parts for aerospace and transport equipment» No FEUE-2023-0006.

### Введение

В современном мире жаропрочные материалы широко применяются в различных отраслях промышленности, включая энергетику, авиацию и транспорт. При механической обработке этих материалов образуются остаточные напряжения, которые могут негативно сказаться на качестве обработанной поверхности и прочности конечных изделий. Остаточные напряжения могут привести к деформациям, трещинам и растяжениям материалов, что приводит к сокращению жизненного цикла изделий и повышению вероятности их выхода из строя [1–3].

Появление остаточных напряжений связано с условиями изготовления деталей, поэтому технологические процессы их производства должны проектироваться так, чтоб возникающие в поверхностных слоях остаточные напряжения гарантировали надежность работы деталей в заданных условиях эксплуатации. Как известно остаточные напряжения бывают двух видов: растягивающие и сжимающие. Растягивающие остаточные напряжения могут вызывать деформацию, трещины в материале, что приводит к разрушению или снижению механических свойств обработанной детали.

На формирование этих остаточных напряжений оказывают влияние такие причины как пластическая деформация, локализованный нагрев и фазовые превращения поверхностных слоев изделия [4].

Кроме того, измерение и контроль остаточных напряжений после механической обработки становится все более важной задачей в связи с возникновением технических сложностей

из-за конструкционных особенностей деталей либо вследствие необходимости разрушения готового изделия.

На данный момент существует множество методов измерения остаточных напряжений: метод рентгеноструктурного анализа, механический, акустический, метод компьютерного моделирования и т.д. Все они имеют свои достоинства и недостатки, которые влияют на выбор конкретного метода измерения [5–7].

В настоящее время широкое распространение получил метод компьютерного моделирования процесса точения [8]. В работе предлагается рассмотреть этот метод в качестве способа определения уровня остаточных напряжений при точении жаропрочных материалов в зависимости от разных режимов резания, а именно при изменении скорости резания и подачи режущего инструмента. Целью исследования является проведение сравнительного анализа механического метода Давиденкова и конечно-элементного метода определения остаточных напряжений с целью установления факта, что метод компьютерного моделирования позволяет на стадии технологической подготовки производства прогнозировать с достаточной вероятностью возникновение деформационных явлений после механической обработки.

### Описание проблемной ситуации и постановка задачи

Современное производство на стадии технологической подготовки закладывает определенный уровень остаточных напряжений при обработке жаропрочных изделий. Применяемый

на производстве механический метод определения уровня остаточных напряжений является отработанным и надежным, однако имеет существенный недостаток – разрушение готового изделия после механической обработки.

Новейшие методы компьютерного моделирования позволяют спрогнозировать уровень остаточных напряжений на стадии технологической подготовки производства.

### Методика исследований

При исследовании влияния элементов режимов резания на формирование остаточных напряжений использовали труднообрабатываемые материалы, обладающие высоким сопротивлением к пластической деформации и разрушению при действии высоких температур и окислительных сред, применяемые в авиастроении, энергомашиностроении и производстве специальных изделий, имеющие существенно различный химический и структурно-фазовый состав,

физико-механические свойства, уровень относительной обрабатываемости резанием: жаропрочные деформируемые сплавы на никелевой основе ХН73МБТЮ и ХН77ТЮР (табл. 1) [9].

Сплав ХН73МБТЮ (ЭИ698) относится к дисперсионно-твердеющим жаропрочным сплавам на никелевой основе, упрочняющихся вследствие выделения интерметаллидной фазы  $\gamma'$  – фазы типа  $Ni_3(Al, Ti)$  [10]. Сложнолегированный сплав ХН73МБТЮ имеет высокую длительную прочность в интервале температур, сочетающихся с достаточно высокой пластичностью. Эти свойства сплава обеспечиваются в результате сложной термической обработки. Сплав ХН77ТЮР (ЭИ437 Б) относится к жаропрочным деформируемым сплавам на никелевой основе. Данный материал обладает высокой пластичностью, хорошо обрабатывается давлением, допускает штамповку, прокатку, профилирование, хорошо сваривается [11].

**Таблица 1.** Физико-механические свойства исследуемых материалов  
**Table 1.** Physico-mechanical properties of the materials under study

Обрабатываемый материал Processed material	Состояние State	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	<i>HB</i>	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Назначение Purpose
ХН73МБТЮ	Нагрев до 775 °С, выдержка 16 ч., охлаждение на воздухе +700 °С, выдержка 16–20 ч., охлаждение на воздухе Heating up to 775 °C, holding for 16 hours, cooling in air +700 °C, holding for 16–20 hours, cooling in air	1 210	800	285–341	31	24	Ответственные детали паровых и газовых турбин современных энергетических установок Critical parts of steam and gas turbines of modern energy installations
ХН77ТЮР	Аустенитизация при 1 080 °С в течение 8 ч., охлаждение на воздухе, старение при 700 °С в течение 16 ч., охлаждение на воздухе Austenitization at 1,080 °C for 8 hours, air cooling, aging at 700 °C for 16 hours, air cooling	950	660	321–255	20	21	Рабочие лопатки, турбинные диски, кольца и другие детали газовых турбин, для службы при температуре до 750 °С Working blades, turbine disks, rings and other parts of gas turbines, for service during temperatures up to 750 °C

*Примечание.*  $\sigma_b$  – временное сопротивление разрыву при растяжении;  $\sigma_T$  – предел текучести; *HB* – твердость по Бринеллю;  $\delta$  – относительное удлинение после разрыва;  $\psi$  – относительное сужение после разрыва.

*Note.*  $\sigma_b$  – temporary tensile tear resistance;  $\sigma_T$  – yield strength; *HB* – Brinell hardness;  $\delta$  – relative elongation after rupture;  $\psi$  – relative contraction after rupture.

При проведении экспериментов использовали режущий инструмент для обработки канавок (с геометрией режущего инструмента  $\lambda = 0^0$ ,  $\gamma = 0^0$ ,  $\alpha = 7^0$ ,  $r = 1,5$  мм) с физико-механическими характеристиками, представленными в табл. 2. Материал пластины – твердая мелкозернистая вольфрамкобальтовая основа с 6 % содержанием кобальта, обладающая повышенной красностойкостью и стойкостью к пластической деформации с покрытием TiAlN [12].

С целью исследования формирования остаточных напряжений в зависимости от режимов резания рациональное сочетание обрабатываемых материалов и инструмента выбраны согласно рекомендациям [13, 14].

Механическая обработка проводилась на токарном станке с числовым программным управлением, оснащенным двумя мотор-шпинделями. Зажим образцов производился путем движения задней шпиндельной бабки в сторону передней шпиндельной бабки дополнительно в тело заготовки после контакта на 0,2 мм. Схема базирования заготовки представлена на рис. 1.

Согласно литературным источникам [15–17] **Ошибка! Источник ссылки не найден.** для материала ХН73МБТЮ оптимальными режимами резания являются скорость резания в условиях чистовой обработки  $V = 25$  м/мин., а подача режущего инструмента  $S = 0,05$  мм/об.,

**Таблица 2.** Физико-механические свойства инструмента  
**Table 2.** Physical and mechanical properties of the tool

Наименование Name	Материал ВК8 Material WK8
Плотность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	14,4–14,8
Удельное электросопротивление, мкОм · см Specific electrical resistivity, μOhm · cm	18,6
Коэффициент линейного термического расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}$ град <sup>-1</sup> Coefficient of linear thermal expansion, $\alpha \cdot 10^{-6}$ deg <sup>-1</sup>	5,1
Коэффициент теплопроводности, кал/(см · с · град) Thermal conductivity coefficient, cal/(cm · s · deg)	0,12
Предел прочности на изгиб, МПа Ultimate bending strength, MPa	1 568
Предел прочности на сжатие, МПа Ultimate compressive strength, MPa	4 127±22
Твердость HRA Hardness HRA	87



**Рис. 1.** Схема базирования заготовки  
**Fig. 1.** Workpiece basing scheme

а для ХН77ТЮР –  $V = 23$  м/мин,  $S = 0,2$  мм/об. В связи с этим на основании методики планирования эксперимента были определены режимы резания (табл. 3).

В результате обработки были получены втулки (рис. 2), из которых были вырезаны пластины электроэрозионным методом (рис. 3). После вырезки пластинок из образца, они выгнулись на различную величину прогиба в зависимости от режимов резания.

После вырезки пластины были подготовлены для определения остаточных напряжений

механическим методом Давиденкова и методом компьютерного моделирования.

### Модель процесса резания для определения остаточных напряжений

Для моделирования процесса точения был использован программный пакет Deform3D.

При описании пластической деформации материала использована модель Джонсона – Кука, позволяющая учесть кинематическое упрочнение и адиабатический разогрев деформируемого материала:

Таблица 3. Режимы резания

Table 3. Cutting modes

Номер образца Sample number	Скорость резания, м/мин Cutting speed, m/min	Подача, мм/об Supply, mm/rev
ХН73МБТЮ		
1	25	0,05
2	30	0,05
3	40	0,05
4	20	0,05
5	50	0,05
ХН77ТЮР		
1	18	0,2
2	23	0,2
3	35	0,2



Рис. 2. Втулка после проведения лезвийной обработки  
Fig. 2. Bushing after machining processing

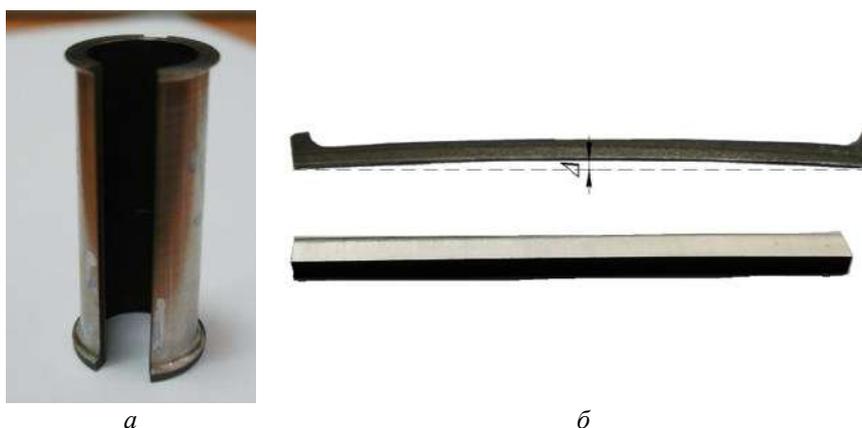


Рис. 3. Изготовление пластин электроэрозионным методом:

*a* – заготовка в виде втулки; *б* – готовые образцы

Fig. 3. Production of plates by the electroerosion method:

*a* – blank in the form of a sleeve; *b* – finished samples

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right],$$

где  $\varepsilon$  – эффективная пластическая деформация;

$\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$  – эффективная скорость пластической де-

формации;  $A$  – предел текучести неупрочненно-го материала, МПа;  $B$  – коэффициент упрочнения при деформировании;  $C$  – константа скорости деформации;  $n$  – экспонента твердости;  $m$  – константа термического смещения;  $T$  – текущая температура, °К;  $T_r$  – начальная температура, °К;  $T_m$  – температура плавления материала, °К [18].

Определение параметров модели выпол-

няется на основе информации о пластических деформациях материала при разных интенсивностях деформирования и температурах [19]. В качестве критерия стружкоотделения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку. Имитировалось сводное резание, величина подачи инструмента учитывалась за счет ширины среза (рис. 4).

Заготовка с постоянной скоростью  $V$  движется навстречу инструменту. Режущий инструмент имеет возможность двигаться только вдоль оси  $x$ . В качестве граничных условий происходит задание контакта, т.е. взаимодействие объектов друг с другом. При моделировании

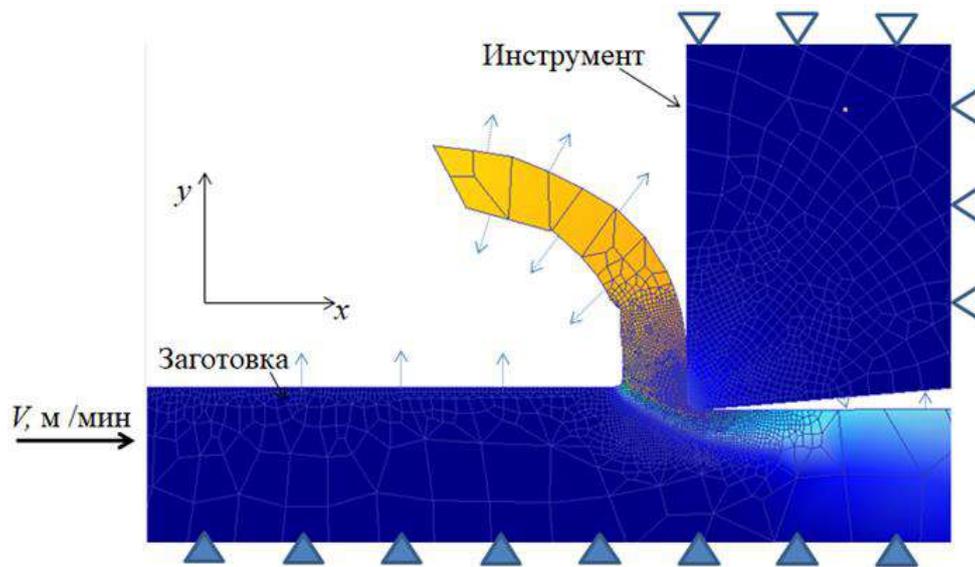


Рис. 4. Представление начальных граничных условий  
Fig. 4. Model of the initial boundary conditions

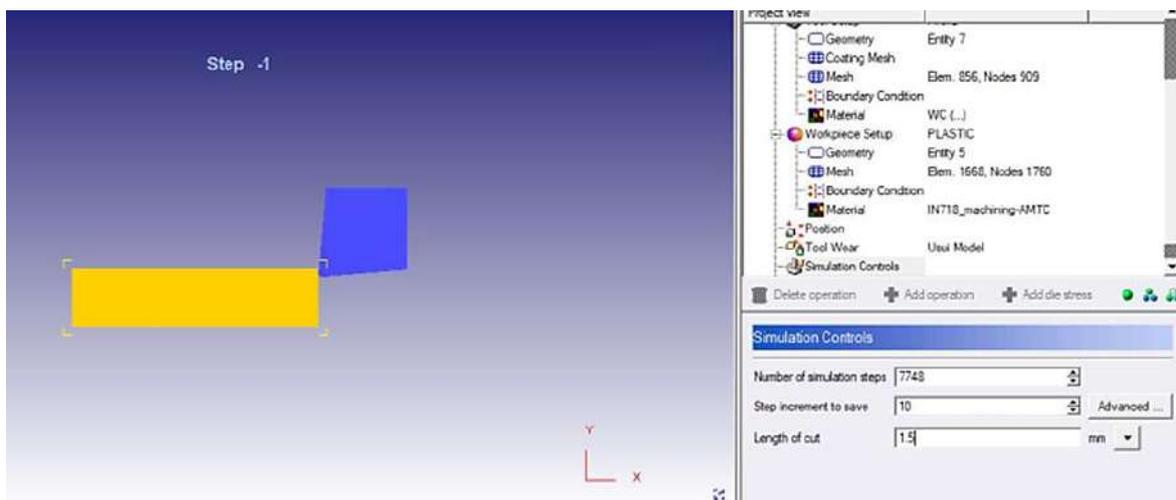
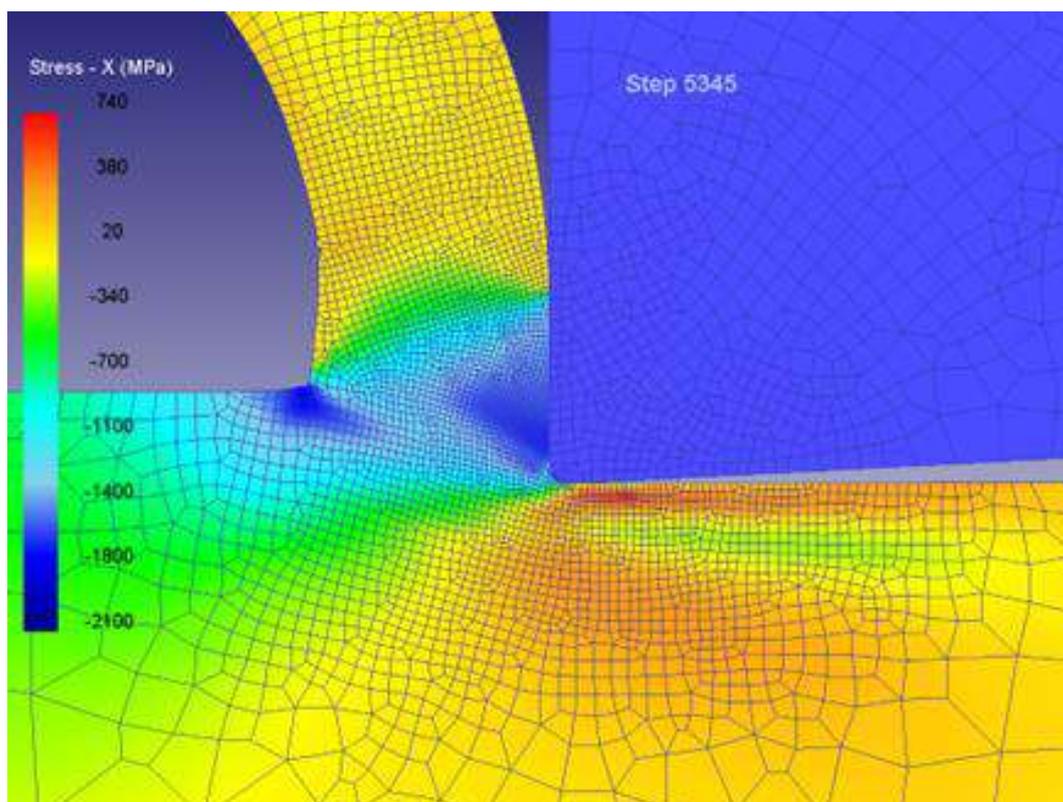


Рис. 5. Окно управления симуляцией  
Fig. 5. Simulation control window



**Рис. 6.** Поле напряжений в зоне резания  
**Fig. 6.** Stress field in the cutting zone

процесса течения необходимо создать взаимодействие заготовки и режущего инструмента, так как большое значение в данной задаче будет иметь внутреннее трение и деформации в плоскости сдвига в заготовке в процессе резания. В данных взаимодействиях указываются коэффициенты теплопередачи, трения и др. [20–23].

Далее программа просчитывает оптимальное количество шагов симуляции и шаг приращения для сохранения (рис. 5).

В результате моделирования определялись поля напряжения в зоне контакта материала с режущим инструментом (рис. 6).

### Механический метод определения остаточных напряжений

Данный метод заключается в том, что с поверхности полученных пластин за счет электролитического и электрохимического травления снимается некоторый поверхностный слой, при этом происходит измерение деформации и толщины образца. Далее по аналитическим формулам рассчитываются остаточные напряжения.

Образец для измерения остаточных напряжений крепится на подвеске, предварительно весь покрытый лаком или воском, кроме исследуемой поверхности (рис. 7, 8).



**Рис. 7.** Исследуемый образец, закрепленный на подвеске  
**Fig. 7.** Test sample mounted on a suspension



**Рис. 8.** Установка для исследования остаточных напряжений

**Fig. 8.** Installation for studying residual stresses

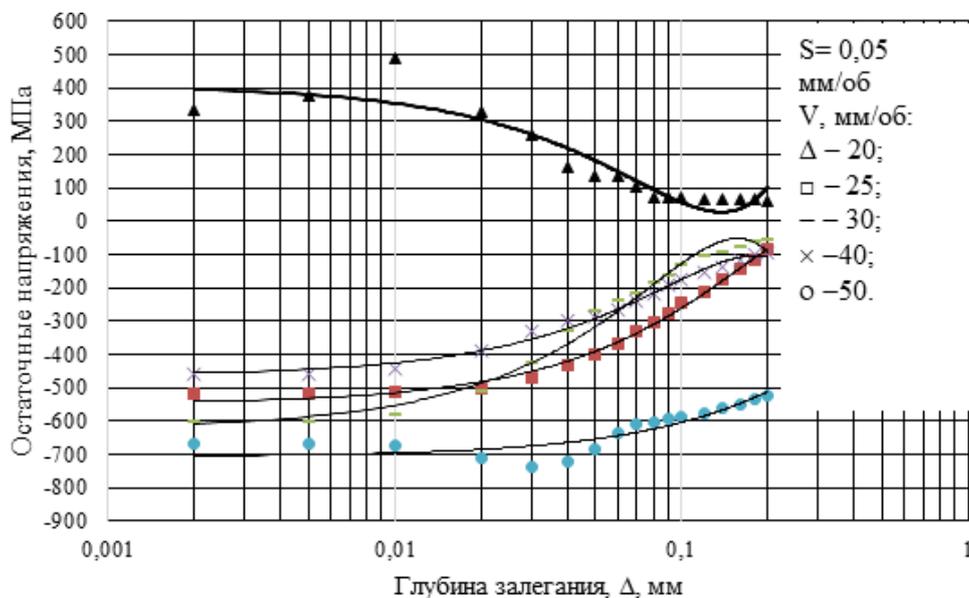
Путем электрохимического травления производилось непрерывное удаление напряженных поверхностных слоев и одновременно осуществлялась регистрация деформаций изгиба образца. Для точного измерения перемещений и деформаций применяют индикаторные, оптические приборы, тензометрию, индуктивные и токовихревые датчики, механотроны, топографическую технику, хрупкие покрытия и

др. В данном случае применялся лазерный триангуляционный датчик. Состав ванны для травления подбирался с учетом химического состава и свойств исследуемого металла. Скорость электрохимического травления зависит от плотности тока, состава, степени загрязнения электролита. Плотность тока выбиралась с учетом необходимой скорости травления и ограничивалась допустимой температурой нагрева электролита, повышение которой сопровождается значительными температурными деформациями установки и погрешностями измерений [24].

### Результаты исследований

В результате проведенных исследований были получены зависимости (рис. 9, 10) формирования остаточных напряжений при различных скоростях резания ( $V = 20\text{--}50$  м/мин.).

Изменение скорости резания не показало какой-либо четкой закономерности влияния на уровень остаточных напряжений. Это связано со сложными механизмами упрочнения обрабатываемого материала при возрастании скорости деформирования и с наложением многих факторов (неоднородность фазового состава и свойств материала, вариативность контактных напряжений и температур и др). В двух случаях из трех увеличение скорости резания приводит к повышению остаточных напряжений. С увеличением



**Рис. 9.** Зависимость величины остаточных напряжений от глубины их залеганий

при точении при постоянной подаче резания и различных скоростях резания ХН73МБТЮ

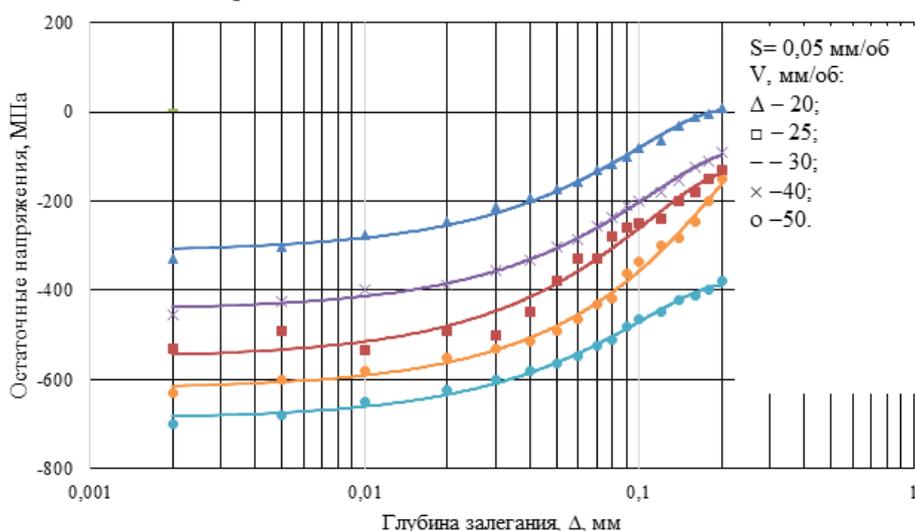
**Fig. 9.** The dependence of the magnitude of residual stresses on the depth of their occurrence during turning with a constant supply of cutting and different cutting speeds CrNi73MoNbTiAl

скорости резания снижается глубина проникновения напряжений постоянного уровня – с повышением скорости заготовка успевает прогреться на меньшую глубину.

При обработке образца из материала ХН77ТЮР при изменении скорости резания от 18 до 35 м/мин были получены зависимости, представленные на рис. 11 и 12.

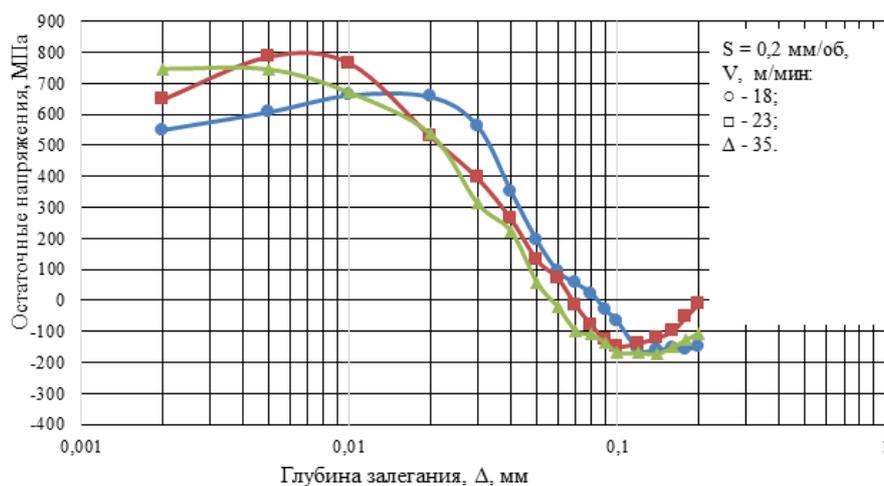
Как видно из зависимостей при изменении скоростей на поверхности образца сформированы напряжения растяжения 210–750 МПа на глубине 0,005 мм. После преодоления экс-

тремума на глубине 0,01 мм напряжения растяжения переходят в напряжения сжатия, однако глубина их залегания незначительна. Напряжения растяжения на поверхности образца обусловлены преобладающим влиянием температурного фактора при механообработке. Результаты, полученные экспериментальным методом и методом компьютерного моделирования, коррелируют между собой в пределах 10 %, что является допустимым согласно исследованиям автора [25].



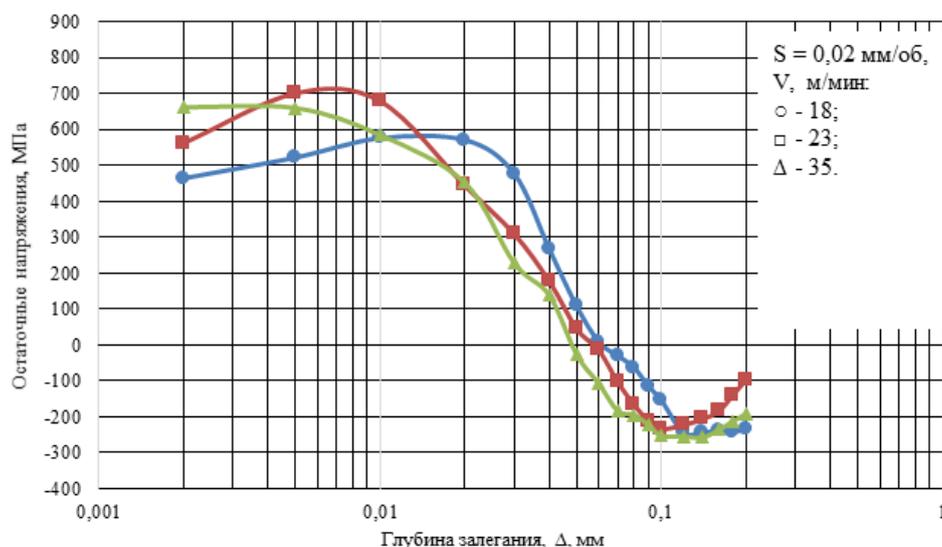
**Рис. 10.** Зависимость величины остаточных напряжений от глубины их залеганий при точении при постоянной подаче режущего инструмента и различной скорости резания, полученных методом компьютерного моделирования ХН73МБТЮ

**Fig. 10.** The dependence of the magnitude of residual stresses on the depth of their occurrence during turning with a constant supply of cutting tools and different cutting speeds obtained by the method computer simulation CrNi73MoNbTiAl



**Рис. 11.** Зависимость величины остаточных напряжений от глубины их залеганий при точении при постоянной подаче резания и различных скоростях резания ХН77ТЮР

**Fig. 11.** The dependence of the magnitude of residual stresses on the depth of their occurrence during turning with constant supply of cutting and different cutting speeds NIMONIC 80A



**Рис. 12.** Зависимость величины остаточных напряжений от глубины их залеганий при точении при постоянной подаче режущего инструмента и различной скорости резания, полученных методом компьютерного моделирования ХН77ТЮР

**Fig. 12.** The dependence of the magnitude of residual stresses on the depth of their occurrence during turning with a constant supply of cutting tools and different cutting speeds obtained by computer modeling NIMONIC 80

### Заключение

Скорость резания – самый сложный фактор, оказывающий влияние на характер остаточных напряжений [26, 27] и их неоднородное формирование вследствие взаимного воздействия пластической деформации и физико-механических превращений.

Однако применение метода компьютерного моделирования для определения остаточных напряжений при обработке жаропрочных материалов на этапе технологической подготовки производства позволяет прогнозировать и контролировать уровень и знак остаточных напряжений.

Для проверки адекватности компьютерной модели достаточно экспериментально определить уровень остаточных напряжений, а в дальнейшем возможно использование компьютерной модели для моделирования формирования остаточных напряжений.

Разработанная модель расчета остаточных напряжений при точении позволяет рассчитать глубину пластически деформированного слоя и распределение остаточных напряжений по глубине.

### Список литературы

1. Безъязычный В.Ф. Влияние технологических условий механической обработки на величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьева. 2020. №1 (52). С. 51–57.
2. McClung R.C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2007. Vol. 30, Iss. 3. P. 173–205.
3. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М. : Машгиз, 1963. 232 с.
4. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М. : Машиностроение, 1976. 278 с.
5. Мухин В.С. Поверхность. Технологические аспекты прочности деталей ГТД. М. : Наука, 2005. 295 с.
6. Процессы формообразования деталей в машиностроении / В.М. Кишуров, Н.К. Криони, В.В. Постнов и др. М. : Машиностроение, 2015. 496 с.
7. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург : УрФУ, 2015. 247 с.
8. Fe Modelling and Simulation of the Turning Process Considering the Cutting Induced Hardening of Workpiece Materials / J. Li, F. Jiang, A. Jin et al. // SSRN : site. 2023. Jul. DOI: 10.2139/ssrn.4511598.
9. Масленков С.Б. Жаропрочные стали и сплавы. М. : Металлургия, 1983. 191 с.
10. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов. Красноярск : СФУ, 2008. 312 с.
11. Волков Г.М., Зуев В.М. Материаловедение. М. : Академия, 2008. 400 с.
12. Каталог Sandvik токарные инструменты 2017 // SteelCam : сайт. URL : <https://docs.steelcam.org/sandvik/katalog->

tokarnye-instrumenty-2017-page1 (Дата обращения 18.09.2023).

13. Резание материалов. Режущий инструмент / В.М. Кишуров, Н.К. Криони, В.В. Постнов и др. М. : Машиностроение, 2009. 491 с.

14. Обработка резанием в машиностроении / В.М. Балашов, В.В. Мешков, С.П. Рыков и др. Тверь : ТвГТУ, 2004. 176 с.

15. Резание материалов / С.Н. Григорьев, А.Г. Схиртладзе, В.А. Скрябин и др. Пенза : ПГУ, 2010. 628 с.

16. Технология машиностроения (в 2 кн.). Книга 1. Основы технологии машиностроения / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, С.Л. Мурашкин и др. М. : Высш. шк., 2003. 278 с.

17. Шифрин А.Ш., Резницкий Л.М. Обработка резанием коррозионностойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов. М. ; Л. : Машиностроение, 1964. 447 с.

18. Determination of the Johnson-Cook Constitutive Model Parameters of Materials by Cluster Global Optimization Algorithm / Z. Huang, L. Gao, Y. Wang et al. // Journal of Materials Engineering and Performance. 2016. Vol. 25. Iss. 9. P. 4099–4107. DOI: 10.1007/s11665-016-2178-1.

19. Соболев А.В., Радченко М.В. Использование модели пластичности Джонсона-Кука в численном моделировании бросковых испытаний контейнеров для транспортирования ОЯТ // Изв. высш. учеб. заведений. Ядерная энергетика. 2016. № 3. С. 82–93.

20. Deform-3D // Тесис : сайт. URL : [https://tesis.com.ru/cae\\_brands/deform/3d.php](https://tesis.com.ru/cae_brands/deform/3d.php) (Дата обращения 18.09.2023).

21. A Gear Cutting Predictive Model Using the Finite Element Method / W. Liu, D. Ren, S. Usui et al. // 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations. 2013. Vol. 8. P. 51–56. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.064

22. Precision radial turning of AISI D2 steel / J. Paulo Davim, C. Maranhao, P. Faria et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. Vol. 42. Iss. 9. P. 842–849. DOI:10.1007/s00170-008-1644-9.

23. Investigating Resulting Residual Stresses during Mechanical Forming Process / Stephen A Akinlabi, O.S. Fatoba, P.M. Mashini et al. // 3rd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering. Batu Ferringhi, 2017. Vol. 328. DOI: 10.1088/1757-899X/328/1/012012.

24. Овсеев Е.С. Обеспечение качества изготовления малогабаритных деталей типа дисков газотурбинных установок за счет снижения технологических остаточных деформаций : дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 144 с.

25. Криворучко Д.В., Залого В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы. Сумы : Университетская книга, 2012. 496 с.

26. Su Y. Effect of the cutting speed on the cutting mechanism in machining CFRP // Composite Structures. 2019. Vol. 220. P. 662–676.

27. Кильметова Л.Р., Хадиуллин С.Х., Черников П.П. Анализ исследований влияния элементов режимов резания на возникновение остаточных напряжений при механообработке // Металлообработка. 2019. №3 (111). С. 10–15.

## References

1. Bezyazychnyi V. F. Vliyanie tekhnologicheskikh uslovii mekhanicheskoi obrabotki na velichinu i kharakter raspredeleniya ostatochnykh napryazhenii v poverkhnostnom sloe detali [The influence of technological conditions of machining on the magnitude and nature of the distribution of residual stresses in the surface layer of the part]. *Vestnik RGATU im. P.A. Solov'eva* [Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solov'ev], 2020, no. 1 (52), pp. 51–57.

2. McClung R.C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2007, vol. 30, iss. 3, pp. 173–205.

3. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963. 232 p.

4. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.

5. Mukhin V.S. *Poverkhnost' . Tekhnologicheskie aspekty prochnosti detalei GTD* [Surface. Technological aspects of the strength of gas turbine engine parts]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 295 p.

6. Kishurov V.M., Krioni N.K., Postnov V.V., Chernikov P.P., Kishurov M.V. *Protsestry formoobrazovaniya detalei v mashinostroenii* [Processes of forming parts in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 2015. 496 p.

7. Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. *Ostatochnye napryazheniya v metalloproduksii* [Residual stresses in metal production]. Ekaterinburg: UrFU Publ., 2015. 247 p.

8. Li J., Jiang F., Jin A., Zhang T., Wang X., Huang S., Zeng X., Yao H., Zhu D., Wu X., Yan L., Zha X., Guo B. Fe Modeling and Simulation of the Turning Process Considering the Cutting Induced Hardening of Workpiece Materials. Available at: <https://ssrn.com/abstract=4511598> (Accessed September 18, 2023).

9. Maslenkov S.B. *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1983. 191 p.

10. Merkulova G. A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh splavov* [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous alloys]. Krasnoyarsk: SFU Publ., 2008. 312 p.

11. Volkov G.M., Zuev V.M. *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow: Akademiya Publ., 2008. 400 p.

12. Tokarnye instrumenty Sandvik (Elektronnyi resurs) [Sandvik Turning tools (Electronic resource)]. Available at: <https://docs.steelcam.org/sandvik/katalog-tokarnye-instrumenty-2017-page1> (Accessed September 18, 2023).

13. Kishurov V.M., Krioni N.K., Postnov V.V., Chernikov P.P. *Rezanie materialov. Rezhushchii instrument* [Cutting of materials. Cutting tool]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2009. 491 p.

14. Balashov V.M., Meshkov V.V., Rykov S.P., Skhirtladze A.G. *Obrabotka rezaniem v mashinostroenii* [Cutting in mechanical engineering]. Tver' : TvGTU Publ., 2004. 176 p.

15. Grigor'ev S.N., Skhirtladze A.G., Skryabin V.A., Zverovshchikov V.Z., Artemov I.I., Mashkov A.N., Voyachek I.I. *Rezanie materialov* [Cutting materials]. Penza: PGU Publ., 2010. 628 p.

16. Zhukov E.L., Kozar' I.I., Murashkin S.L., Rozovskii B.Ya., Dyagterev V.V., Soloveichik A.M. Tekhnologiya mashinostroeniya (v 2 kn.). Kniga 1. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya [Mechanical engineering technology (in 2 vol.). Vol. 1. Fundamentals of mechanical engineering technology]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003. 278 p.

17. Shifrin A.Sh., Reznitskii L.M. Obrabotka rezaniem korrozionnostoikikh, zharoprochnykh i titanovykh staley i splavov [Cutting processing of corrosion-resistant, heat-resistant and titanium steels and alloys]. Moscow-Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1964. 447 p.

18. Huang Z., Gao L., Wang Y., Wang F. Determination of the Johnson-Cook Constitutive Model Parameters of Materials by Cluster Global Optimization Algorithm. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25, iss. 9, pp. 4099–4107.

19. Sobolev A.V., Radchenok M.V. Ispol'zovanie modeli plastichnosti Dzhonsona-Kuka v chislennom modelirovanii broskovykh ispytaniy konteynerov dlya transportirovaniya OYaT [Using the Johnson-Cook plasticity model in numerical modeling of throw tests of containers for transporting spent nuclear fuel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Yadernaya energetika* [Bulletins of higher educational organizations. Nuclear power], 2016, no. 3, pp. 82–93.

20. Deform-3D (Elektronnyi resurs) [Deform-3D (Electronic resource)]. Available at: [https://tesis.com.ru/cae\\_brands/deform/3d.php](https://tesis.com.ru/cae_brands/deform/3d.php) (Accessed September 18, 2023).

21. Liu W., Ren D., Usui S., Wadell J., Marusich T.D. A Gear Cutting Predictive Model Using the Finite Element Method. *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, 2013, vol. 8, pp. 51–56.

22. Paulo Davim J., Maranhao C., Faria P., Abrao A., Rubio J.C., Silva L.R. Precision radial turning of AISI D2 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 42, iss. 9, pp. 842–849.

23. Akinlabi S.A., Fatoba O.S., Mashinini P.M., Takinlabi E. Investigating Resulting Residual Stresses during Mechanical Forming Process. *3rd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering. Batu Ferringhi*, 2017, vol. 328. DOI:10.1088/1757-899X/328/1/012012.

24. Ovseenko E.S. Obespechenie kachestva izgotovleniya malozhestkikh detalei tipa diskov gazoturbinykh ustanovok za schet snizheniya tekhnologicheskikh ostatochnykh deformatsii [Ensuring the quality of manufacturing of low-rigid parts such as disks of gas turbine units by reducing technological residual deformations]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2011, 144 p.

25. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. Modelirovanie protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy [Modeling of cutting processes by the finite element method: methodological foundations]. Sumy: Universitetskaya kniga Publ., 2012. 496 p.

26. Su Y. Effect of the cutting speed on the cutting mechanism in machining CFRP. *Composite Structures*, 2019, vol. 220, pp. 662–676.

27. Kilmetova L.R., Khadiullin S.Kh., Chernikov P.P. Analiz issledovaniy vliyaniya elementov rezhimov rezaniya na vozniknovenie ostatochnykh napryazhenii pri mekhanooobrabotke [Analysis of studies of the influence of cutting mode elements on the occurrence of residual stresses during machining]. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2019, no. 3 (111), pp. 10–15.

#### Информация об авторах

**Кильметова Лилия Римовна**, преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов, Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа; e-mail: [kilmetovalr@gmail.com](mailto:kilmetovalr@gmail.com).

#### Information about the authors

**Liliya R. Kil'metova**, Lecturer of the Department of Automation of Technological Processes, Ufa University of Science and Technology, Ufa; e-mail: [kilmetovalr@gmail.com](mailto:kilmetovalr@gmail.com).

## Использование осевых упоров и полимерных гасителей динамических нагрузок в затворах с тонкостенными уплотнениями

Ю.И. Белоголов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉belogolov\_yi@irgups.ru

### Резюме

В уплотнительной технике встречаются конструкции клапанных соединений, где для снижения радиальных деформаций тонкостенного уплотнения в затворе применяются различные осевые упоры и полимерные гасители ударных нагрузок. Использование полимерных материалов в качестве осевых ограничителей компенсирует ударные нагрузки в уплотнительном стыке и обеспечивает дополнительную герметичность (вторичное уплотнение) соединения при относительно небольших усилиях со стороны привода. Однако применение полимерных материалов ограничено условиями эксплуатации (химический состав рабочей среды, давление рабочей среды и др.). Полимерные уплотнения выдавливаются и разрушаются при больших давлениях герметизируемой среды. Также следует отметить изменение физико-механических характеристик полимеров с течением времени, при температурных, радиационных и других воздействиях. Использование исключительно металлических упоров позволяет сократить воздействие ударных нагрузок на тонкостенное уплотнение, но такие конструктивные решения ведут к снижению ресурса уплотнительного соединения и лимитируют область применения. Таким образом, осевые упоры в качестве ограничителей деформации могут быть предусмотрены в конструкции уплотнительного соединения на случай значительного превышения давления герметизируемой среды над расчетным с целью минимизации повреждений затвора клапана. Для ослабления ударных нагрузок в уплотнительном соединении может быть выполнена «разгрузка» затвора. В научной статье представлены обзор и анализ уплотнительных соединений, в которых снижение динамических нагрузок в затворе клапана компенсируется посредством осевых упоров и полимерных гасителей ударных нагрузок. Проведено сравнение указанного способа с одним из перспективных направлений совершенствования клапанных соединений – «разгрузкой». Представлены разработанные автором актуальные конструкции разгруженных затворов, которые позволяют выполнить тонкостенный оболочечный элемент рациональных геометрических размеров, что, в свою очередь, ведет к снижению герметизирующего усилия и энергоемкости привода. Проведенный обзор и анализ показали, что наличие упоров необходимо в условиях нестационарности давления герметизируемой среды, приводящей к значительным изменениям составляющей усилия герметизации.

### Ключевые слова

динамическое ударное нагружение, клапан, разгрузка от давления, полимерные уплотнения, осевые упоры, тонкостенные уплотнения, ограничители деформации уплотнения

### Для цитирования

Белоголов Ю.И. Использование осевых упоров и полимерных гасителей динамических нагрузок в затворах с тонкостенными уплотнениями / Ю.И. Белоголов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3 (79). С. 34–42. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).34-42.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 08.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 18.09.2023 г.; принята к публикации: 19.09.2023 г.

## The use of axial stops and polymer dynamic load absorbers in gates with thin-walled seals

Yu. I. Belogolov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉belogolov\_yi@irgups.ru

### Abstract

In sealing technology, there are valve joint designs, where various axial stops and polymer load absorbers are used to reduce radial deformations of the thin-walled seal in the gate. The use of polymer materials as axial limiters compensates for shock loads in the sealing joint and provides additional tightness (secondary sealing) of the joint with relatively little effort on the part of the drive. However, the use of polymer materials is limited by the operating conditions (chemical composition of the working medium, pressure of the working medium and other conditions). Polymer seals are squeezed out and destroyed at high pressures of the sealed medium. The change should also be noted in the physical and mechanical characteristics of polymers over time, under temperature, radiation, and other influences. The exclusive use of metal stops makes it possible to limit the impact of shock loads on a thin-walled seal, however, such design solutions lead to a decrease in the life of the sealing joint and limits the scope of ap-

plication. Thus, the use of axial stops as deformation limiters can be provided in the design of the sealing joint in case of a significant excess of the pressure of the sealed medium over the calculated one reducing damage to the valve gate. To weaken the shock loads in the sealing joint, the gate can be «unloaded». The scientific article presents an overview and analysis of sealing joints in which the reduction of dynamic loads in the valve gate is compensated by axial stops and polymer load absorbers. The comparison of this method with one of the promising areas of improvement of valve connections – «unloading» is carried out. The actual designs of unloaded gates developed by the author are presented, which allow creating a thin-walled shell element of reasonable geometric dimensions, which, in turn, leads to a decrease in the hermetic effort and energy intensity of the drive. The conducted review and analysis showed that the presence of stops is necessary under conditions of unsteadiness of the sealed medium pressure, leading to significant changes in the component of the sealing force.

### Keywords

dynamic shock loading, valve, pressure relief, polymer seals, axial stops, thin-walled seals, seal deformation limiters

### For citation

Belogolov Yu.I. Ispol'zovanie osevykh uporov i polimernykh gasitelei dinamicheskikh nagruzok v zatvorakh s tonkostennymi uplotneniyami [The use of axial stops and polymer dynamic load absorbers in gates with thin-walled seals]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3 (79), pp. 34–42. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).34-42.

### Article Info

Received: September 8, 2023; Revised: September 18, 2023; Accepted: September 19, 2023.

### Введение

В уплотнительных соединениях, эксплуатация которых протекает в сложных условиях (высокие усилия герметизации, температура, давление, динамические нагрузки), все более широкое распространение получает использование тонкостенных оболочечных элементов, выполненных в виде оболочечно-цилиндрических (реже – конических) элементов. При формировании уплотнительного стыка они легко деформируются, принимая форму ответной детали. Простота формы оболочечного элемента обеспечивает высокую технологичность соединения.

Такие уплотнительные соединения могут быть использованы в разнообразных разъемных соединениях: клапанах, кранах (в том числе и в шаровых), фланцах, штуцерах, стыковочных узлах и т.д. [1–3]. В качестве материалов ответных деталей уплотнительного соединения применяется, как правило, сталь, бронза, латунь и другие, что позволяет использовать соединения в агрессивных средах и в условиях термических воздействий.

Упругий оболочечно-цилиндрический элемент имеет низкую изгибную жесткость, что обеспечивает уплотнительному соединению «металл – металл» сохранение всех преимуществ уплотнения «металл – полимер», позволяет соединить в нем лучшие черты двух типов уплотнений, особенно в тяжелых условиях работы, когда положительные качества соединения проявляются лучшим образом.

В клапанных уплотнительных соединениях тонкостенные оболочечно-цилиндрические

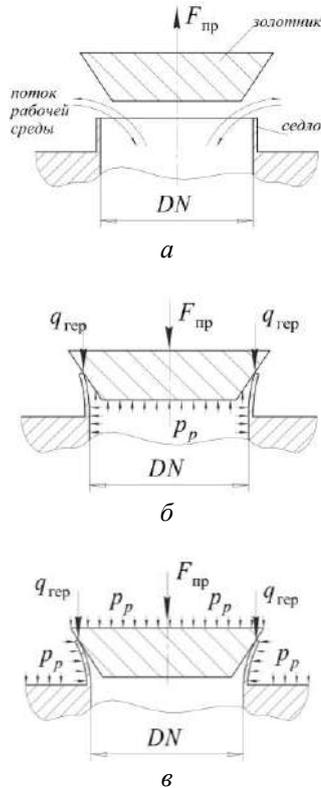
элементы работают в условиях динамического ударного нагружения. Под действием ударных нагрузок, обусловленных прежде всего скоростью срабатывания золотника под действием привода клапана и жесткостью седла, выполненного в виде оболочечно-цилиндрического элемента, может произойти разрушение тонкостенного элемента в затворе уплотнительного соединения при перекрытии потока рабочей среды. С целью снижения динамического ударного воздействия на тонкостенное уплотнение в затворе клапана предусматривают осевые упоры и полимерные ограничители деформации.

Целями настоящей научной публикации являются: исследование и анализ конструктивных решений уплотнительных соединений и пути их модернизации, а также рассмотрение одного из перспективных направлений совершенствования клапанных соединений – «разгрузки» затвора клапана.

### Процесс нагружения тонкостенного уплотнения затвора клапана

Процесс нагружения уплотнительного соединения клапана с тонкостенным оболочечно-цилиндрическим элементом представлен схематически на рис. 1, где  $F_{пр}$  – усилие со стороны привода;  $q_{гер}$  – герметизирующая нагрузка;  $p_p$  – давление рабочей среды;  $DN$  – диаметр условного прохода. Также показан клапан в открытом состоянии (рис. 1, а). При перекрытии клапана (рис. 1, б, в) следует учитывать составляющую давления рабочей среды  $p_p$ , так как в зависимости от направления оно может являться состав-

ляющей созданного усилия герметизации в уплотнительном стыке.



**Рис. 1.** Схема затвора клапана с тонкостенным элементом:

*a* – клапан открыт; *б* – клапан закрыт (давление среды «на золотник»); *в* – клапан закрыт (давление среды «под золотник»)

**Fig. 1.** The scheme of the valve gate with a thin-walled element:

*a* – the valve is opened; *b* – the valve is closed (the pressure of the medium «on the spool»);  
*c* – the valve is closed (the pressure of the medium «under the spool»)



**Рис. 2.** График свободных затухающих колебаний  $\omega$

**Fig. 2.** Graph of free fading oscillations  $\omega$

### Ударные нагрузки в тонкостенных уплотнительных соединениях

В [4–6] показано, что максимальная динамическая нагрузка  $F_{\max}$ , возникающая при соударении золотника с седлом клапана, определяется значением кинетической энергии  $E_k$  и частоты свободных колебаний  $\omega$  золотника (рис. 2), с учетом статической силы  $F_{ст}$ , обеспечивающей герметичность соединения:

$$F_{\max} = F_{ст} + \sqrt{F_{ст}^2 + m \cdot v^2 \cdot c}.$$

На рис. 2 представлен график свободных затухающих колебаний золотника массой  $m$  при единичном ударном нагружении седла клапана.

Под действием  $F_{\max}$  происходит соударение элементов затвора клапана при скорости  $v_{\max}$ , что вызывает смещение на величину  $X_{\max}$ . Последующее соударение элементов затвора в связи с потерями на трение в зоне контакта происходит при меньших скоростях до тех пор, пока значение силы трения  $F_{тр}$  не компенсирует значение кинетической энергии  $E_k$  золотника.

Значение  $\omega$  зависит от массы и жесткости контактируемых элементов и определяется из выражения:

$$\omega^2 = \frac{c_1 + c_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \beta)}{m},$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – жесткость подвижной части затвора и оболочечного элемента соответственно.

Направлениями совершенствования уплотнительных соединений с тонкостенными оболочечно-цилиндрическими элементами могут быть следующие:

– разгрузка «затвора» клапана от давления рабочей среды  $p_p$ , что позволит нагружать тонкостенный оболочечно-цилиндрический элемент только усилием герметизации  $q_{гер}$  [7];

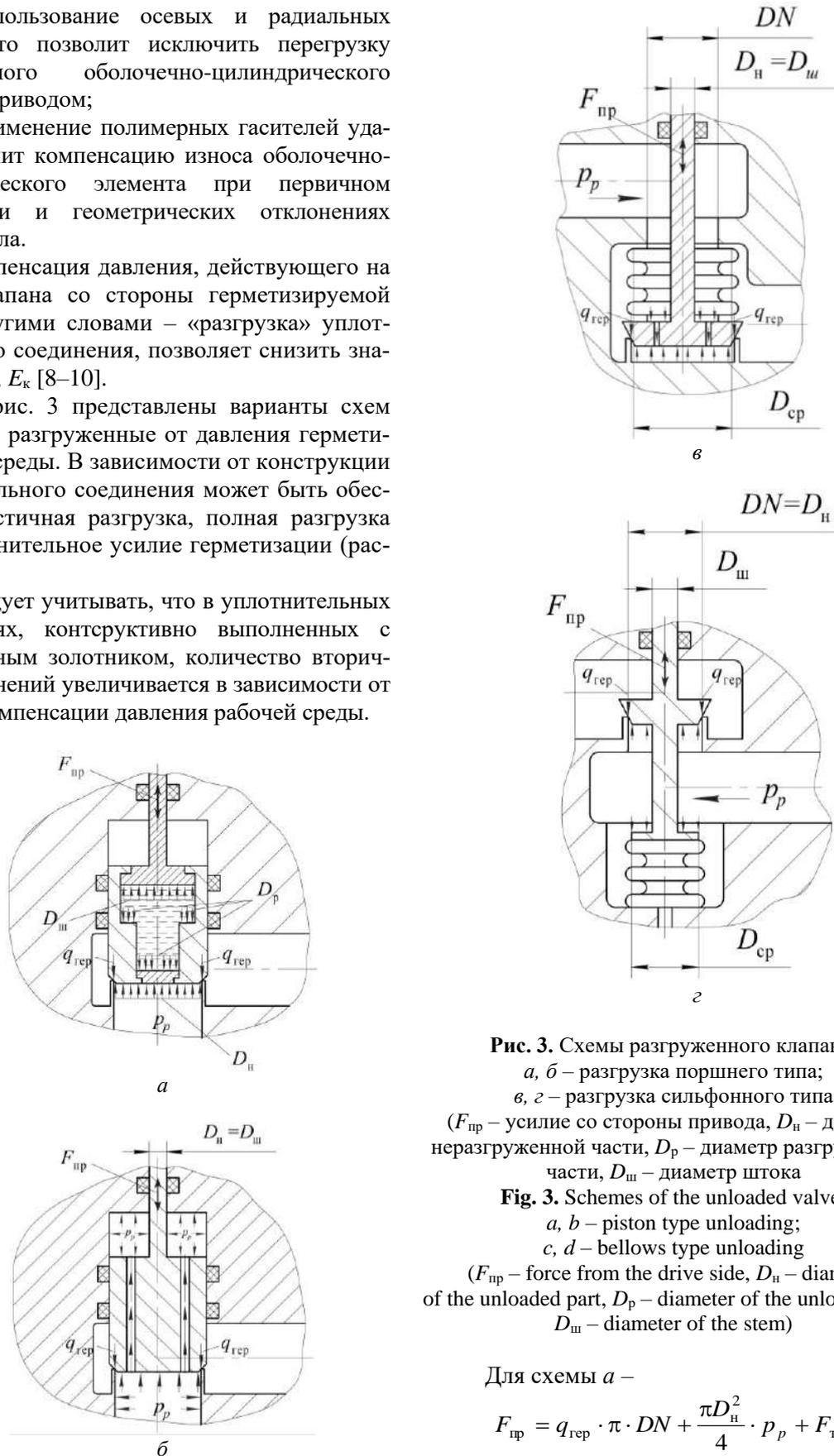
– использование осевых и радиальных упоров, что позволит исключить перегрузку тонкостенного оболочечно-цилиндрического элемента приводом;

– применение полимерных гасителей удара обеспечит компенсацию износа оболочечно-цилиндрического элемента при первичном нагружении и геометрических отклонениях формы седла.

Компенсация давления, действующего на затвор клапана со стороны герметизируемой среды, другими словами – «разгрузка» уплотнительного соединения, позволяет снизить значения  $F_{\max}$ ,  $E_k$  [8–10].

На рис. 3 представлены варианты схем калапанов, разгруженные от давления герметизируемой среды. В зависимости от конструкции уплотнительного соединения может быть обеспечена частичная разгрузка, полная разгрузка или дополнительное усилие герметизации (расчетное).

Следует учитывать, что в уплотнительных соединениях, конструктивно выполненных с разгруженным золотником, количество вторичных уплотнений увеличивается в зависимости от способа компенсации давления рабочей среды.



**Рис. 3.** Схемы разгруженного клапана:  
*a, б* – разгрузка поршневого типа;  
*в, г* – разгрузка сильфонного типа  
 ( $F_{\text{пр}}$  – усилие со стороны привода,  $D_{\text{н}}$  – диаметр неразгруженной части,  $D_{\text{р}}$  – диаметр разгруженной части,  $D_{\text{ш}}$  – диаметр штока  
**Fig. 3.** Schemes of the unloaded valve:  
*a, b* – piston type unloading;  
*c, d* – bellows type unloading  
 ( $F_{\text{пр}}$  – force from the drive side,  $D_{\text{н}}$  – diameter of the unloaded part,  $D_{\text{р}}$  – diameter of the unloaded part,  $D_{\text{ш}}$  – diameter of the stem)

Для схемы *a* –

$$F_{\text{пр}} = q_{\text{гер}} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi D_{\text{н}}^2}{4} \cdot p_{\text{р}} + F_{\text{тр}};$$

схемы б –

$$F_{\text{пр}} = q_{\text{гер}} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi(D_{\text{н}} - D_{\text{п}})^2}{4} \cdot p_p + F_{\text{тр}};$$

схемы в –

$$F_{\text{пр}} = q_{\text{гер}} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi D_{\text{н}}^2}{4} \cdot p_p + F_{\text{тр}};$$

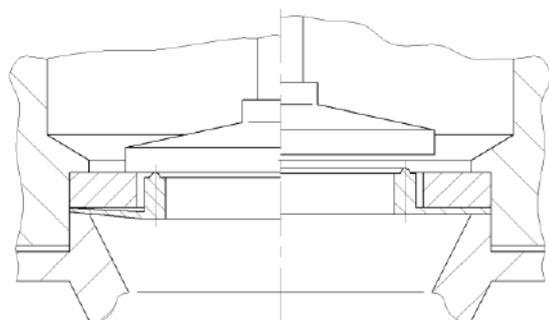
схемы г –

$$F_{\text{пр}} = q_{\text{гер}} \cdot \pi \cdot DN + \left( \frac{\pi \cdot D_{\text{сп}}^2}{4} - \frac{\pi(D_{\text{н}} - D_{\text{п}})^2}{4} \right) \cdot p_p + F_{\text{тр}}.$$

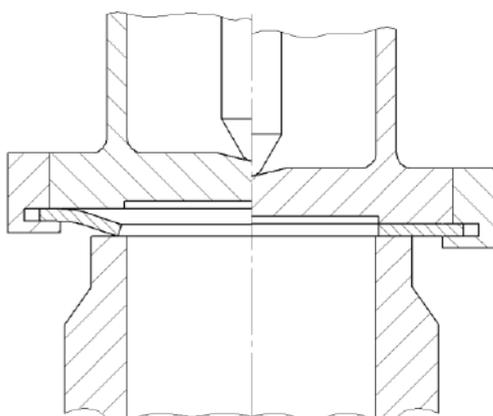
### Осевые упоры и полимерные гасители ударных нагрузок в зоне уплотнения

Использование упоров в качестве ограничителей деформации седла клапана позволяет предотвратить перегрузку тонкостенного элемента герметизирующим усилием со стороны привода.

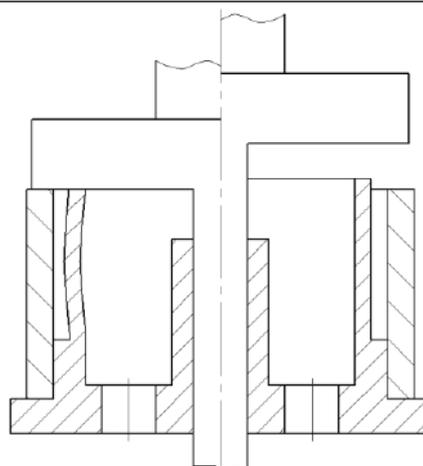
Ниже (рис. 4) представлены различные конструкции клапанов [11–14], где для снижения деформаций оболочечного седла используются радиальные и осевые упоры.



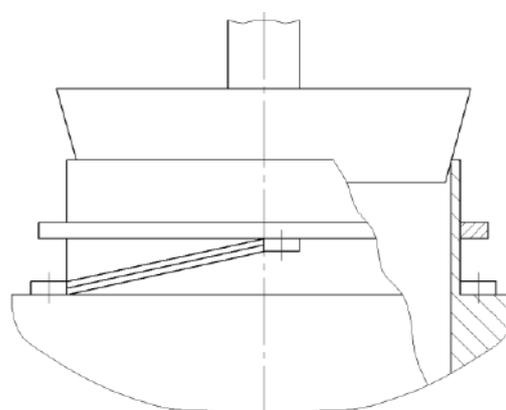
а



б



в



г

**Рис. 4.** Конструкции клапанных уплотнительных соединений:

а – упругое седло клапана; б – предохранительный клапан; в – седло клапана; г – клапан

**Fig. 4.** Designs of valve sealing joints:  
а – elastic valve seat; б – safety valve;  
с – valve seat; д – valve

В конструкции (см. рис. 4, а) контакт седла с золотником затвора линейный за счет выполненного на торцевой части седла выступа. Для ограничения осевых перемещений золотника в конструкции предусмотрен выступ, представляющий собой металлическую втулку, расположенную ниже седла на расчетную величину.

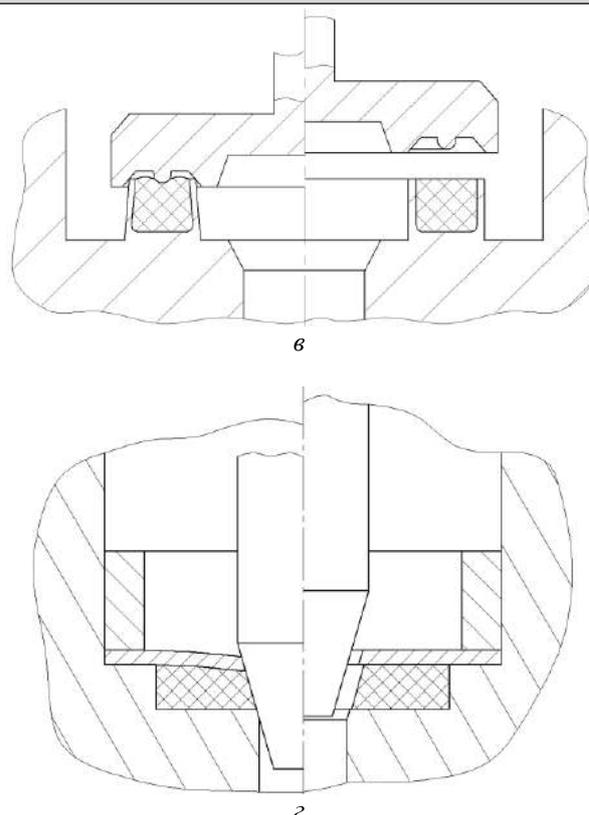
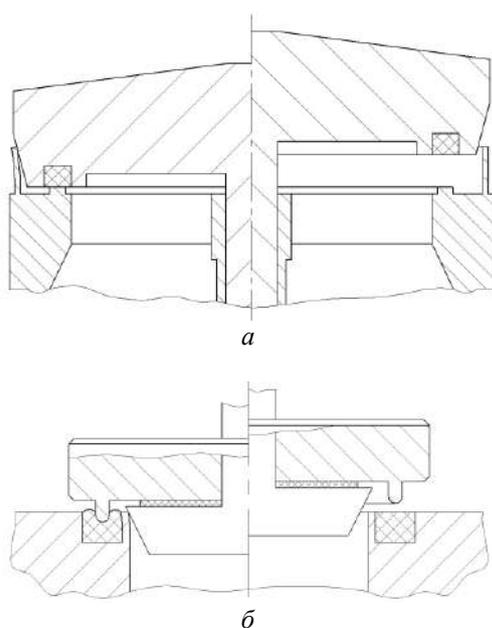
В конструкции (см. рис. 4, б) предложено использование упругого оболочечного элемента, прикрепленного к золотнику или седлу клапана. При отсутствии давления рабочей среды площадь контакта уплотнительных поверхностей является наибольшей вследствие давления привода на уплотнительный элемент. При подаче рабочей среды площадь контакта уплотни-

тельных поверхностей уменьшается, плоский контакт переходит в контакт по линии. Давление, создаваемое рабочей средой на площадь оболочечного элемента, дополнительно поджимает его к седлу клапана.

Целью изобретения (см. рис. 4, в) является повышение надежности и долговечности работы затвора клапана. Конструкция состоит из золотника, уплотнительного элемента, имеющего форму цилиндрической оболочки и упора, предохраняющего оболочку от перегрузки. Упор относительно уплотнительного элемента выполнен соосно. Торцевая поверхность уплотнительного элемента выполнена выше торцевой поверхности упора. Герметичность соединения достигается за счет деформации оболочечного элемента, а ограничение этих деформаций достигается посредством установленного упора.

Изобретение (см. рис. 4, г) нацелено на расширение эксплуатационных возможностей клапана за счет увеличения температурного диапазона. Седло клапана выполнено в виде тонкостенной оболочки с упрочняющим кольцом, имеющим возможность перемещаться вдоль образующей седла, а на корпусе клапана закреплен по меньшей мере один биметаллический фиксатор, взаимодействующий с упрочняющим кольцом.

Примеры использования полимерных гасителей ударных нагрузок в зоне контакта «золотник – седло» представлены на рис. 5 [15–18].



**Рис. 5.** Конструкции клапанных уплотнительных соединений:

*a* – уплотнительный узел;  
*б, в* – уплотнительный узел клапанных устройств;  
*г* – уплотнительный узел высокого давления

**Fig. 5.** Designs of valve sealing joints:  
*a* – sealing unit; *b, c* – sealing assembly of valve devices;  
*d* – high pressure sealing unit

Конструкция (см. рис. 5, а) состоит из седла, выполненного в виде тонкостенного оболочечного элемента, и затвора, имеющего коническую форму. Упор, ограничивающий деформацию оболочечного элемента, выполнен в виде дублирующего торцевого уплотнения.

Согласно [19, 20], в случае дублирующего торцевого уплотнения «ввиду значительных (по отношению к модулю упругости полимера) давлений герметизации влиянием отклонений формы и волнистости можно пренебречь. При этом характер контакта преимущественно упругий». Следовательно, упор такой конструкции не отвечает тем требованиям, которые к нему предъявляются.

Затвор клапана (см. рис. 5, б) состоит из двух контактных уплотнений, одно из которых образовано конической поверхностью золотника и седла, выполненного в виде оболочечного

элемента, а второе – острой кромкой, расположенной на торцевой поверхности золотника, и кольцом из эластичного материала, размещенным в проточке корпуса. Упор такой конструкции не отвечает тем требованиям, которые к нему предъявляются. Использование полимерного материала снижает жесткость упора, что особенно актуально при высоких скоростях и ударных нагрузках золотника.

С целью повышения надежности и долговечности уплотнительного соединения (см. рис. 5, в) на затворе выполнены конические поверхности, а в корпусе – тонкостенные цилиндрические оболочки. Между оболочками расположено эластичное кольцо, а на затворе между коническими поверхностями выполнен торцевой выступ. При перекрытии потока рабочей среды конические поверхности вступают в контакт с тонкостенными оболочками по наружному диаметру, а торцевой выступ вдавливаются в эластичное кольцо.

Конструкция (см. рис. 5, г) предназначена для работы в области высоких давлений. Затвор состоит из золотника конической формы и седла, выполненного в виде тонкостенной пластины, опирающейся на демпфирующий элемент в виде эластичного кольца. Края пластины зажаты между корпусом клапана и металлической втулкой. Преимуществами изобретения являются простота конструкции, малые массогабаритные параметры и длительный ресурс работы. При этом возможно заклинивание золотника в седле и, как следствие, деформация тонкостенной пластины.

При отборе конструкций, представленных на рис. 4 и 5, преследовалась цель отобразить многообразие конструктивных решений и проследить пути совершенствования уплотнительных соединений с тонкостенными элементами.

Многообразие конструкций с осевыми и радиальными упорами свидетельствует о том, что вопросу снижения деформаций тонкостенных уплотнений уделяется большое внимание в арматуростроении.

Достаточно часто используются тонкостенные элементы сложной геометрической формы, которые технологически трудно реализовать на практике. Конструкции уплотнительных соединений, где для снижения динамических нагрузок применяются осевые упоры и

полимерные гасители удара, сложны в изготовлении. Такие конструктивные решения ведут к снижению ресурса уплотнительного соединения и имеют ограниченную область применения.

### Заключение

Использование тонкостенных оболочечно-цилиндрических элементов уплотнения требует тщательного анализа напряженно-деформированного состояния. Область рациональных размеров (толщины) оболочечных элементов достаточно узкая.

Простейшие расчетные модели тонкостенных элементов строятся на базе модели Кирхгофа – Лява, более сложные задачи, например, расчет контактных давлений в стыке уплотнительных поверхностей, решаются на базе модели Тимошенко – Рейснера. Особое внимание должно быть уделено динамической нагруженности тонкостенных элементов при их использовании в клапанных уплотнениях. В общем случае возникающая при соударении динамическая нагрузка связана с кинематической энергией подвижных частей клапана в момент соударения и может меняться в широких пределах в зависимости от условий эксплуатации клапана. В таких случаях необходимо в первую очередь обращать внимание на конструктивные способы выбора рациональных размеров оболочечного элемента, когда при максимально возможной кинетической энергии соударения возникающие в оболочечном элементе напряжения не превышают предела текучести.

Кроме того, особое внимание должно быть обращено на ограничение деформации оболочечных элементов, когда из-за внештатной ситуации условия нагружения выходят за пределы расчетных.

При этом применение осевых упоров и полимерных гасителей удара усложняет конструкцию уплотнительного соединения, ведет к снижению ресурса и может быть использовано только в случаях «перегрузки» затвора давлением рабочей среды с целью исключения значительных повреждений элементов уплотнения.

Указанные мероприятия позволяют выполнить тонкостенный элемент минимальной жесткости, что, в свою очередь, ведет к минимизации усилий по герметизации и энергоемкости привода.

## Список литературы

1. Уплотнения и уплотнительная техника / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др. М. : Машиностроение, 1986. 464 с.
2. Гуревич Д.Ф. Трубопроводная арматура. Л. : Машиностроение, 1981. 368 с.
3. Кармугин Б.В., Стратиневский Г.Г., Мендельсон Д.А. Клапанные уплотнения пневмогидроагрегатов. М. : Машиностроение, 1983. 152 с.
4. Долотов А.М., Огар П.М., Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирования уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов. М. : Изд-во МАИ, 2000. 296 с.
5. Герасимов С.В., Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Математическая модель динамического нагружения двухседельного клапана // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 126–129.
6. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Определение перемещений в оболочечно-пластинчатом седле клапана // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 22–28.
7. ГОСТ 24856-2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения. Введ. 2015–04–01. М. : Стандартинформ, 2020. 90 с.
8. Белоголов Ю.И. Компенсация усилий, действующих на затвор со стороны герметизируемой среды // Проблемы транспорта Восточной Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Иркутск : ИрГУПС, 2012. С. 124–128.
9. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Обзор способов разгрузки золотника клапана от давления герметизируемой среды // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 3 (7). С. 30–36.
10. Долотов А.М., Зацарный В.А. Расчет жесткости упругих затворов // Вестн. Львов. политехн. ин-та. 1983. № 170. С. 65–66.
11. А. с. 167104 СССР. Упругое седло клапана / Б. И. Кондратишко (СССР). № 799296/25-8 ; заявл. 18.10.62 ; опубл. 12.12.64, Бюл. № 24. 2 с.
12. А. с. 396520 СССР. Предохранительный клапан / Г.В. Мамонтов, Б.З. Абросимов, М.А. Зайцев. № 131816/25-8 ; заявл. 28.08.69 ; опубл. 29.08.73, Бюл. № 36. 3 с.
13. А. с. 338721 СССР. Седло клапана / Б.Н. Николаев. № 1452160/25-8 ; заявл. 08.06.70 ; опубл. 15.05.72, Бюл. № 16. 2 с.
14. А. с. 1603119 СССР. Клапан / А.М. Долотов, П.М. Огар, В.М. Квасов и др. № 4629018/31-29 ; заявл. 30.12.88 ; опубл. 30.10.90, Бюл. № 40. 3 с.
15. А. с. 463828 СССР. Уплотнительный узел / Д.Ф. Пасынков, В.М. Мартынов, Н.Н. Пономарев и др. № 1912638/25-8 ; заявл. 28.04.73 ; опубл. 15.03.75, Бюл. № 10. 2 с.
16. А. с. 607084 СССР. Уплотнительный узел клапанных устройств / Б.В. Кармугин. № 2431128/25-08 ; заявл. 20.12.76 ; опубл. 15.05.78, Бюл. № 18. 2 с.
17. А. с. 731157 СССР. Уплотнительный узел клапанных устройств / Б.В. Кармугин. № 2610697/25-08 ; заявл. 04.05.78 ; опубл. 30.04.80, Бюл. № 16. 2 с.
18. Пат. 2062931 Рос. Федерация. Уплотнительный узел высокого давления / С.Н. Компанистов. № 94017291/06 ; заявл. 10.05.94 ; опубл. 27.06.96. 6 с.
19. Шпаков О.Н. Азбука трубопроводной арматуры. СПб. : Компрессорная и химическая техника, 2003. 217 с.
20. Гошко А.И. Арматура трубопроводная целевого назначения. Ч. 1: Выбор. Эксплуатация. Ремонт. М. : Машиностроение, 2003. 423 с.

## References

1. Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B., Gordeev V.V., Furmanov B.A., Karmugin B.V. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika [Seals and sealing equipment]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1986. 464 p.
2. Gurevich D.F. Truboprovodnaya armatura [Pipeline fittings]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1981. 368 p.
3. Karmugin B.V., Stratinevskii G.G., Mendel'son D.A. Klapannye uplotneniya pnevmogidroagregatov [Valve seals of pneumohydraulic units]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 152 p.
4. Dolotov A.M., Ogar P.M., Chegodaev D.E. Osnovy teorii i proyektirovaniya uplotneniy pnevmogidroarmatury letatel'nykh apparatov [Fundamentals of the theory and design of seals for aircraft pneumohydraulic fittings]. Moscow: MAI Publ., 2000. 296 p.
5. Gerasimov S.V., Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Matematicheskaya model' dinamicheskogo nagruzeniya dvukhsedel'nogo klapana [Mathematical model of dynamic loading of a two-seated valve]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences], 2012, vol. 1, pp. 126–129.
6. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Opredelenie peremeshchenii v obolochечно-plastinchatom sedle klapana [Determination of displacements in the shell-plate valve seat]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology], 2013, no. 2 (18), pp. 22–28.
7. GOST 24856-2014. Armatura truboprovodnaya. Terminy i opredeleniya [State Standard 24856-2014. Pipeline valves. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. 90 p.
8. Belogolov Yu.I. Kompensatsiya usilii, deistvuyushchikh na zatvor so storony germetiziruemoi sredy [Compensation for the efforts acting on the shutter from the side of the sealed medium]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii mo-lodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Problemy transporta Vostochnoi Sibiri»* [Proceedings of All-Russian scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students «Problems of transport of Eastern Siberia»]. Irkutsk,

2012, pp. 124–128.

9. Dolotov A.M., Belogolov Yu.I. Obzor sposobov razgruzki zolotnika klapanov ot davleniya germetiziruemoi sredy [Review of methods for unloading the valve spool from the pressure of the sealed medium]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology], 2010, no. 3 (7), pp. 30–36.

10. Dolotov A.M., Zatsarnyi V.A. Raschet zhestkosti uprugikh zatvorov [Calculation of the rigidity of elastic gates]. *Vestnik L'vovskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the Lviv Polytechnic Institute], 1983, no. 170, pp. 65–66.

11. Kondratishko B.I. Copyright certificate SU 167104 A1, 12.12.1964.

12. Mamontov G.V., Abrosimov B.Z., Zaitsev M.A. Copyright certificate SU 396520 A1, 29.08.1973.

13. Nikolaev B.N. Copyright certificate SU 338721 A1, 15.05.1972.

14. Dolotov A.M., Ogar P.M., Kvasov V.M., Kondrashov Yu.I. Copyright certificate SU 1603119 A1, 30.10.90.

15. Pasyukov D.F., Martynov V.M., Ponomarev N.N., Vol'skii V.V., Nefedov V.F. Copyright certificate SU 463828 A1, 15.03.75.

16. Karmugin B.V. Copyright certificate SU 607084 A1, 15.05.78.

17. Karmugin B.V. Copyright certificate SU 731157 A2, 30.04.80.

18. Kompanistov S.N. Patent RU 2062931 C1, 27.06.1996.

19. Shpakov O.N. *Azbuka truboprovodnoi armatury* [ABC of pipeline fittings]. Saint Petersburg: Kompresornaya i khimicheskaya tekhnika Publ., 2003. 217 p.

20. Goshko A.I. *Armatura truboprovodnaya tselevogo naznacheniya. Ch. 1: Vyb. Eksploatatsiya. Remont* [Pipeline fittings for special purposes. Vol. 1: Choice. Exploitation. Repair]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003. 423 p.

#### Информация об авторе

**Белоголов Юрий Игоревич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: belogolov\_yi@irgups.ru.

#### Author

**Yurii I. Belogolov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Work Operation Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: belogolov\_yi@irgups.ru.

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ТРАНСПОРТ**

**TRANSPORT**

## Моделирование режимов системы тягового электроснабжения, использующей трансформаторы с обмотками, соединенными в открытый треугольник

А.В. Крюков<sup>1,2</sup>, А.В. Черепанов<sup>1</sup>✉, Д.А. Серёдкин<sup>1</sup>, И.А. Фесак<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉smart\_grid@mail.ru

### Резюме

В электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям железных дорог переменного тока, может возникать значительная несимметрия трехфазных напряжений. При небольших мощностях короткого замыкания на шинах 110–220 кВ тяговой подстанции коэффициенты несимметрии по обратной последовательности могут заметно превышать предельно допустимые значения. Анализ отечественных и зарубежных публикаций позволяет сделать вывод об актуальности исследований, направленных на решение проблемы уменьшения несимметрии в системах электроснабжения железных дорог. Предлагаемые методы и средства решения этой проблемы отличаются многовариантностью подходов. Поэтому выбор технически рационального способа решения должен базироваться на результатах моделирования, основанного на адекватных цифровых моделях. Для создания таких моделей можно применять подход, использующий фазные координаты. В статье приведены результаты исследований, направленных на определение технической эффективности применения систем тягового электроснабжения, в которых применяются трансформаторы с обмотками, соединенными в открытый треугольник. Разработаны цифровые модели, обеспечивающие моделирование сложно несимметричных и несинусоидальных режимов таких систем тягового электроснабжения. Результаты моделирования показали, что при небольших размерах движения эффективность симметрирования в схеме с тяговым трансформатором открытого треугольника по сравнению с типовой существенно возрастает. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности  $k_{2U}$  уменьшаются на 15–25 %. Максимумы суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ тяговых подстанций снижаются на 22–47 %. Итоговые показатели по напряжениям на токоприемниках электропоездов в обеих схемах различаются на доли процентов, за исключением минимального напряжения четного поезда, которое в схеме с тяговым трансформатором открытого треугольника ниже аналогичного показателя для типовой системы тягового электроснабжения примерно на 3 %. В схеме с тяговым трансформатором открытого треугольника максимальные значения потерь в линии электропередач уменьшаются на 7 %, а в тяговых сетях увеличиваются на 16 %. Снижение потерь в линии электропередач связано с выравниваем нагрузок по фазам. Повышение потерь в тяговых сетях вызвано пониженными напряжениями в схеме с тяговым трансформатором открытого треугольника по сравнению с типовой системой тягового электроснабжения. Из-за снижения напряжений возрастают токи, что приводит к увеличению напряженностей магнитного поля. Разработанные цифровые модели могут применяться на практике при выборе средств симметрирования на участках дорог с размерами движения, не достигающими пределов пропускной способности.

### Ключевые слова

системы тягового электроснабжения, трансформаторы с обмотками, открытый треугольник, моделирование

### Для цитирования

Моделирование режимов системы тягового электроснабжения, использующей трансформаторы с обмотками, соединенными в открытый треугольник / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, Д.А. Серёдкин, И.А. Фесак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 44–57. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).44-57.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 03.05.2023 г.; поступила после рецензирования: 30.05.2023 г.; принята к публикации: 31.05.2023 г.

### Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока и электромагнитных полей на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока».

## Modeling modes of a traction power supply system using transformers with windings connected into an open triangle

A.V. Kryukov<sup>1,2</sup>, A.V. Cherepanov<sup>1</sup>✉, D.A. Sereдкин<sup>1</sup>, I.A. Fesak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉smart\_grid@mail.ru

**Abstract**

In electrical circuits adjacent to traction substations of AC railways, significant asymmetry of three-phase voltages can occur. At low short-circuit powers on 110–220 kV traction substation buses, the asymmetry coefficients in the reverse sequence can significantly exceed the maximum allowable values. An analysis of domestic and foreign publications allows to conclude that research aimed at solving the problem of reducing asymmetry in railway power supply systems is relevant. The proposed methods and means of solving this problem are characterized by multiple variants of approaches. Therefore, the choice of a technically rational solution method should be based on the results of modeling based on adequate digital models. To create such models, approach based on the use of phase coordinates can be used. The article presents the results of studies aimed at determining the technical efficiency of the use of traction power supply systems using transformers with open delta windings. Digital models have been developed providing simulation of complexly asymmetric and non-sinusoidal modes of such traction power supply systems. The simulation results showed that with small movement sizes, the efficiency of balancing in a circuit with an open delta windings transformer increases significantly as compared to a typical one. The coefficients of asymmetry in the reverse sequence  $k_{2U}$  decrease by 15–25 %. The maximum total harmonic coefficients at the inputs of 220 kV traction substations are reduced by 22–47 %. The final indicators for voltages on the current collectors of electric locomotives in both circuits differ by fractions of a percent, with the exception of the minimum of the even train voltage, which in the transformers with open delta windings circuits is lower than the similar indicator for a typical traction power supply system by about 3 %. In the circuit with open delta winding transformers, the maximum values of losses in power lines are reduced by 7 %, while in traction networks they increase by 16 %. Reduction of losses in power transmission lines is associated with the alignment of loads by phases. The increase in losses in the traction networks is caused by lower voltages in the circuit with open delta winding transformers as compared to a typical traction power supply system. Due to the decrease in voltages, currents increase, which results in an increase in the magnetic field strength. The developed digital models can be applied in practice when choosing means of balancing on road sections with traffic sizes that do not reach the capacity limits.

**Keywords**

traction power supply systems, transformers with windings, open triangle, modeling

**For citation**

Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Serezhkin D.A., Fesak I.A. Modelirovanie rezhimov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya, ispol'zuyushchei transformatory s obmotkami, soedinennymi v otkrytyi treugol'nik [Modeling modes of a traction power supply system using transformers with windings connected in an open triangle]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 44–57. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).44-57.

**Article info**

Received: May 3, 2023; Revised: May 30, 2023; Accepted: May 31, 2023.

**Acknowledgement**

The research was carried out within the framework of the state task «Conducting applied scientific research» on the topic «Development of methods, algorithms and software for modeling the modes of traction power supply systems of DC railways and electromagnetic fields at traction substations of AC railways».

**Введение**

В электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям (ТП) железных дорог переменного тока, может возникать значительная несимметрия трехфазных напряжений, вызванная однофазными тяговыми нагрузками. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлены результаты измерений коэффициентов несимметрии на шинах 220 кВ ТП Транссиба [1]. Номер у каждого графика, приведенного рис. 1, соответствует порядковому номеру часа измерений, отсчитываемому от 16.00 мск.

Из рис. 1 видно, что уровни несимметрии могут в 1,3–3,3 раза превышать предельно допустимое значение. Несимметричные режимы приводят к следующим негативным последствиям:

– нарушение технологических процессов, снижение качества выпускаемой продукции, уменьшение производительности рабочих механизмов;

– возрастание потерь электрической энергии;

– снижение надежности электроснабжения из-за ускоренного старения изоляции, а также сбоев в работе устройств релейной защиты и автоматики.

Поэтому задача разработки методов и средств уменьшения несимметрии в электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям, имеет несомненную актуальность.

Вопросам уменьшения уровней несимметрии в сетях, примыкающих к ТП, посвящено значительное число работ. Так, в статье [2] описаны технические решения, обес-

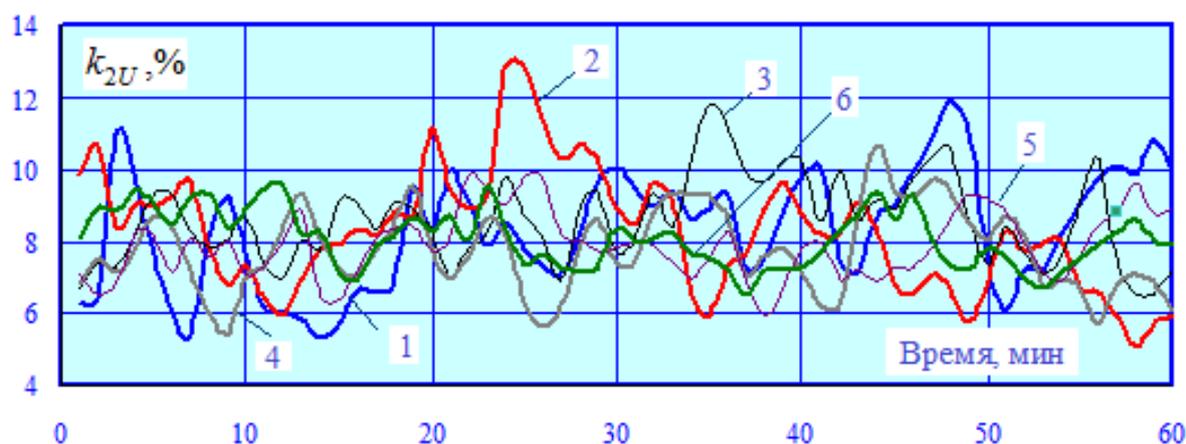


Рис. 1. Результаты измерений коэффициентов несимметрии  
 Fig. 1. The results of measurements of the asymmetry coefficients

печаивающие снижение несимметрии в системах тягового электроснабжения (СТЭ). В работе [3] сформулированы задачи, решение которых позволит уменьшить остроту проблемы несимметрии в СТЭ. В статье [4] проанализирована эффективность применения симметрирующих трансформаторов Скотта, Вудбриджа, Р.Р. Мамошина и А.В. Василянского для уменьшения коэффициентов  $k_{2U}$  в СТЭ. В работе [5] проведен анализ режимов работы СТЭ Дальневосточной железной дороги и предложены мероприятия по нормализации схем подключения ТП, обеспечивающие повышение пропускной способности и снижение несимметрии. В статье [6] для уменьшения  $k_{2U}$  предлагается использовать многофункциональный вольтодобавочный трансформатор. В работе [7] показано, что несимметрия и несинусоидальность напряжений в сетях, примыкающих к ТП, приводит к снижению показателей, характеризующих надежность электроснабжения потребителей. В статье [8] описаны интеллектуальные преобразователи для симметрирования электротяговой нагрузки. В работе [9] предложен способ выравнивания нагрузок на ТП с симметрирующими трансформаторами, основанный на использовании нерегулируемых устройств компенсации реактивной мощности. В статье [10] рассмотрены вопросы уменьшения несимметрии в трехфазной сети, питающей ТП скоростных железных дорог. Работа [11] посвящена решению задачи выбора средств снижения несимметрии в сетях с высокой долей тяговой нагрузки. В статьях [12, 13] предложена модель оптимальной балансировки однофазной тяговой нагрузки на основе метода

Штейнмеца. В работе [14] приведено решение задач балансировки токов, компенсации реактивной мощности и гармоник на электрифицированной железнодорожной сети с помощью стабилизатора мощности. В статье [15] предложен бестрансформаторный компенсатор, который можно использовать на тяговых подстанциях для балансировки нагрузки. Результаты исследования влияния тяговой нагрузки высокоскоростной электрифицированной железной дороги на качество электроэнергии представлены в работе [16]. Гибридный метод активной компенсации баланса токов на основе схемы соединения  $Y/\Delta$  – 11 тягового трансформатора рассмотрен в статье [17]. Модульный многоуровневый преобразователь для улучшения качества электроэнергии в СТЭ рассмотрен в работе [18]. Результаты анализа несбалансированных режимов в сети, питающей тяговые нагрузки, представлены в статье [19]. Одно из возможных решений задачи балансировки нагрузок на ТП переменного тока описано в работе [20].

Анализ представленных выше отчетственных и зарубежных публикаций позволяет сделать вывод об актуальности исследований, направленных на решение проблемы уменьшения несимметрии в системах электроснабжения железных дорог. Предлагаемые методы и средства решения этой проблемы отличаются многовариантностью подходов. Поэтому выбор технически рационального способа решения должен базироваться на результатах моделирования, основанного на адекватных цифровых моделях. Для создания таких моделей можно использовать подход, предложенный в работе [21], бази-

рующийся на использовании фазных координат и реализованный в промышленном программном комплексе (ПК) Fazonord.

Ниже приведены результаты исследований, направленных на определение технической эффективности применения СТЭ, использующих трансформаторы с обмотками, соединенными в открытый треугольник (ОТ) [22, 23]. Следует отметить, что такие трансформаторы можно применять в системах электроснабжения объектов агропромышленного комплекса [24–27].

### Постановка задачи

В работе [22] описана система электроснабжения железной дороги переменного тока с применением трансформаторов со схемой соединения обмоток «открытый треугольник», обеспечивающая загрузку малонагруженной фазы внешнего электроснабжения (рис. 2).

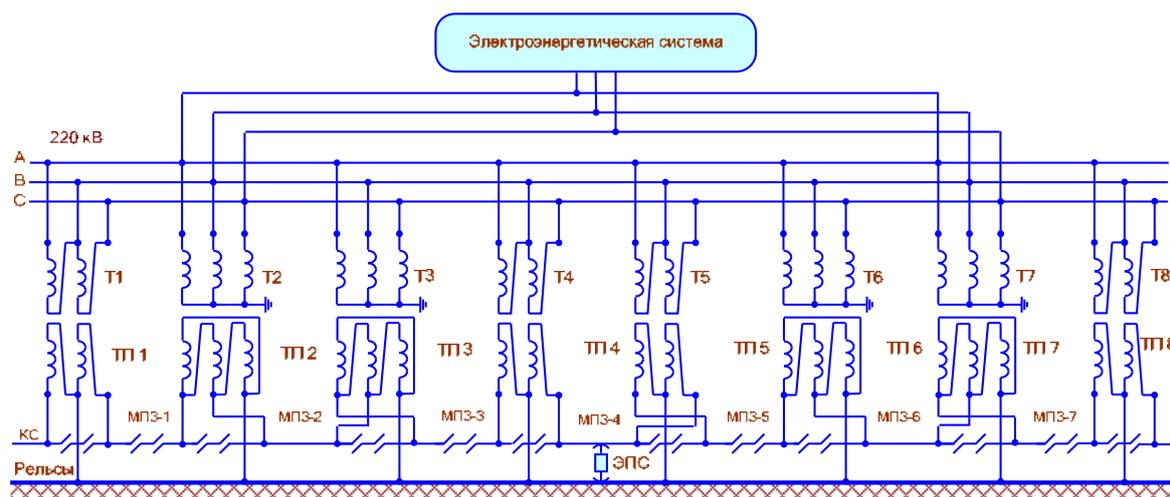
В этой схеме симметрирование осуществляется за счет искусственной загрузки малонагруженной фазы с помощью пары трансформаторов: трехфазного со схемой  $Y/\Delta$  и двухфазного, использующего соединение обмоток  $V/V$  и включенного с высокой стороны на линейные напряжения. В середине такой межподстанционной зоны выполняется нейтральная вставка. Для улучшения симметрирования и обеспечения резерва питания предложена схема с группой из восьми ТП и

дополнительной цепью, питающей линию электропередач (ЛЭП).

Для оценки симметрирующего эффекта реализована цифровая модель [29] в ПК Fazonord, центральная часть схемы которой показана на рис. 3.

На первом этапе исследований, результаты которых представлены в работе [29], рассматривались размеры движения, близкие к пределу пропускной способности СТЭ. В таких режимах схема, предложенная в [22], не показала заметного снижения несимметрии по сравнению с СТЭ, оснащенной трехфазными трансформаторами, подключенными по схеме винта. На втором этапе, результаты которого приведены ниже, размеры движения были уменьшены путем увеличения межпоездного интервала до 30 мин. (рис. 4).

На первом этапе исследований, результаты которых представлены в работе [29], рассматривались размеры движения, близкие к пределу пропускной способности СТЭ. В таких режимах схема, предложенная в [22], не показала заметного снижения несимметрии по сравнению с СТЭ, оснащенной трехфазными трансформаторами, подключенными по схеме винта. На втором этапе, результаты которого приведены ниже, размеры движения были уменьшены путем увеличения межпоездного интервала до 30 мин. (рис. 4).



**Рис. 2.** Схема системы тягового электроснабжения:

$T$  – тяговый трансформатор;  $ТП$  – тяговая подстанция;  $МПЗ$  – межподстанционная зона;  
 $КС$  – контактная сеть;  $ЭПС$  – электроподвижной состав

**Fig. 2.** Diagram of the traction power supply system:

$T$  – traction transformer;  $ТП$  – traction substation;  $МПЗ$  – intersubstation zone;  $КС$  – contact circuit;  
 $ЭПС$  – electric rolling stock

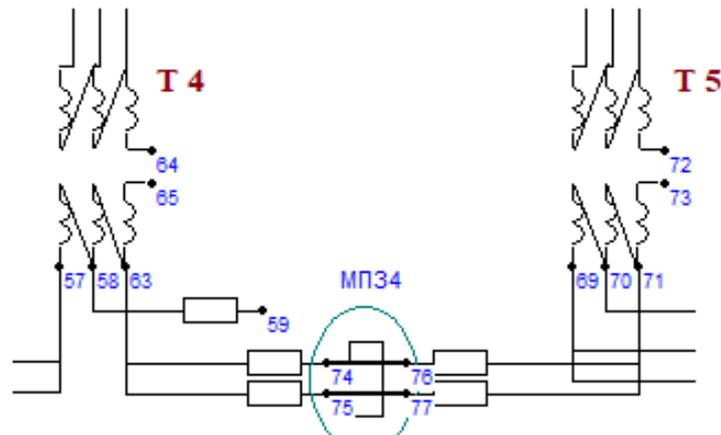


Рис. 3. Центральная часть схемы расчетной модели  
Fig. 3. The central part of the calculated model scheme

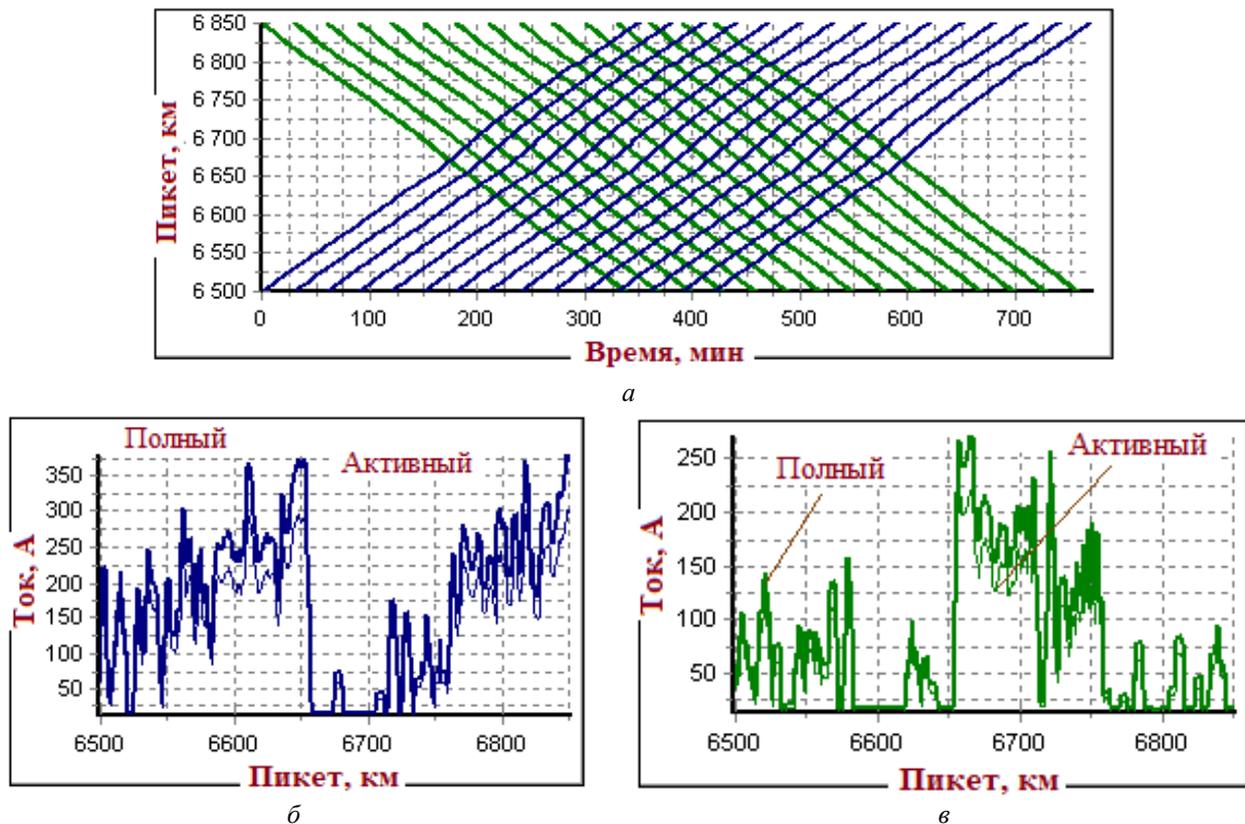
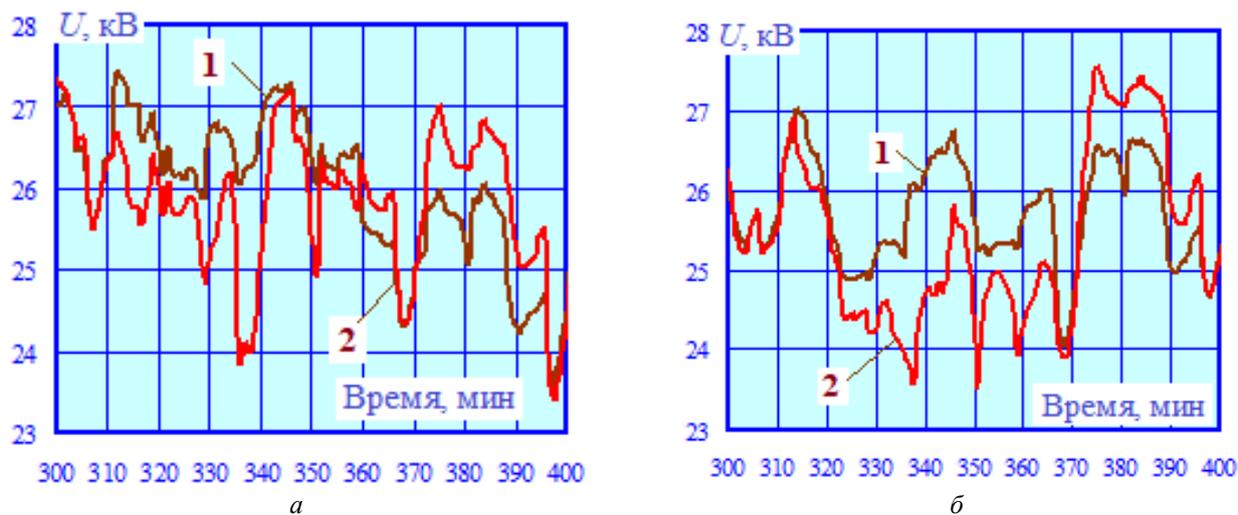


Рис. 4. График движения (а) и зависимости токов электровозов от пикета для четного (б) и нечетного (в) поездов

Fig. 4. Schedule of movement (a) and dependence of electric locomotive currents on the picket for even (б) and odd (в) trains

Результаты моделирования показаны на рис. 5–12 и в табл. 1–6. На рис. 5 показана динамика изменения напряжений на токоприемниках электровозов в схеме СТЭ с тяговыми трансформаторами по схеме открытого треугольника (ТТ ОТ), а также в СТЭ типовой конструкции с трехфазными трансформатора-

ми. Из рис. 5 и табл. 1 видно, что итоговые показатели в обеих схемах различаются на доли процентов, за исключением минимального напряжения четного поезда, которое в схеме ТТ ОТ ниже аналогичного показателя для типовой СТЭ примерно на 3 %.



**Рис. 5.** Изменение напряжений на токоприемниках электровозов (1 – типовая система тягового электроснабжения 25 кВ; 2 – система тягового электроснабжения с трансформаторами по схеме открытого треугольника):

*a* – поезд № 10 нечетного направления; *б* – поезд № 32 четного направления;

**Fig. 5.** Change in voltage at the current collectors of electric locomotives (1 – typical 25 kV traction power supply system; 2 – traction power supply system with transformers according to the open triangle scheme):

*a* – train No 10 of an odd direction; *b* – train No 32 of an even direction

**Таблица 1.** Сводные показатели по напряжениям на токоприемниках

**Table 1.** Summary indicators for voltages on current collectors

Направление Direction	Показатель	Схема системы тягового электроснабжения Scheme of traction power supply system		Различие, % Difference, %
		Типовая Typical	С трансформаторами по схеме открытого треугольника With open triangle scheme transformers	
Нечетное Odd	Минимум Minimum	23,56	23,41	0,62
	Среднее значение Average value	26,71	26,57	0,53
	Максимум Maximum	28,28	28,19	0,33
Четное Even	Минимум Minimum	24,07	23,39	2,80
	Среднее значение Average value	26,17	25,88	1,08
	Максимум Maximum	28,27	28,27	0,01

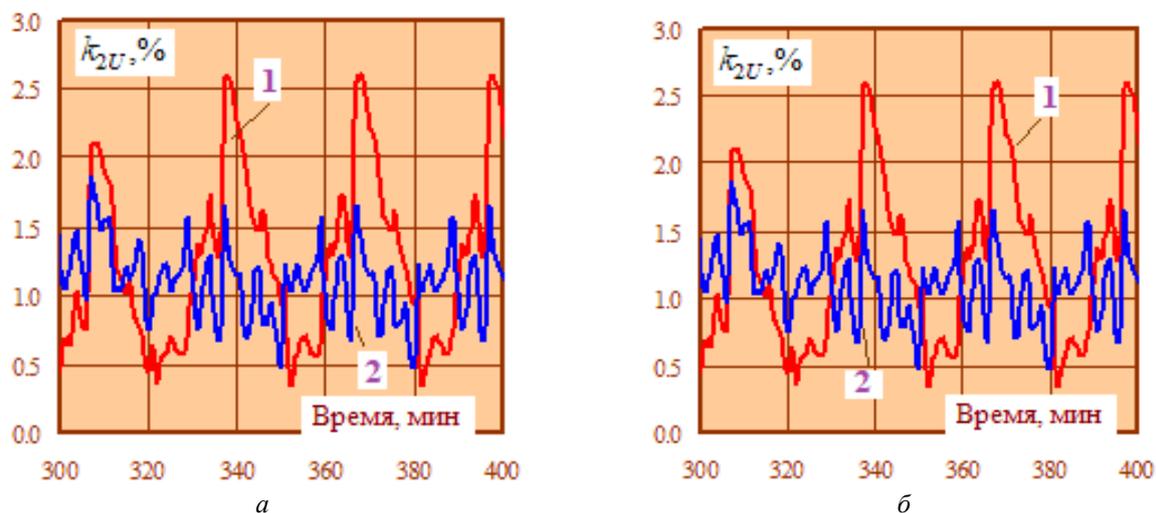
В табл. 2 и на рис. 7 приведены максимальные значения коэффициентов несимметрии на шинах 220 кВ ТП, а на рис. 6 показана динамика их изменений во времени. Диаграмма, иллюстрирующая величины снижения максимальных значений  $k_{2U}$  за счет использования трансформаторов с обмотками, соединенными в ОТ, приведена на рис. 8. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что схема

СТЭ с ТТ ОТ при пониженных размерах движения обеспечивает уменьшение  $k_{2U}$  на 16–25 %.

Сводные показатели по потерям активной мощности в тяговой сети (ТС) и ЛЭП 220 кВ представлены в табл. 3. На рис. 9 показаны графики, характеризующие динамику их изменений во времени. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что по сравнению с типовой в схеме с ТТ ОТ максимальные значения потерь в ЛЭП уменьшаются

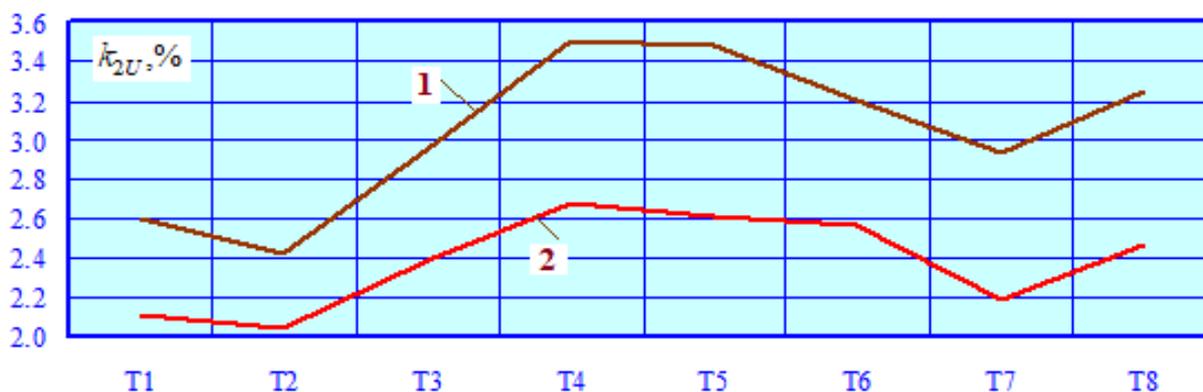
на 7 %, в ТС увеличиваются на 16 %. Снижение потерь в ЛЭП связано с выравниванием нагрузок по фазам при использовании схемы с ТТ ОТ. Повышение потерь в ТС вызвано пониженными напряжениями в схеме с ТТ ОТ по сравнению с типовой СТЭ (см. табл. 1).

В табл. 4 и 5 приведены сводные данные по суммарным коэффициентам гармоник на шинах 220 кВ ТП, полученные на основе моделирования несинусоидальных режимов СТЭ.



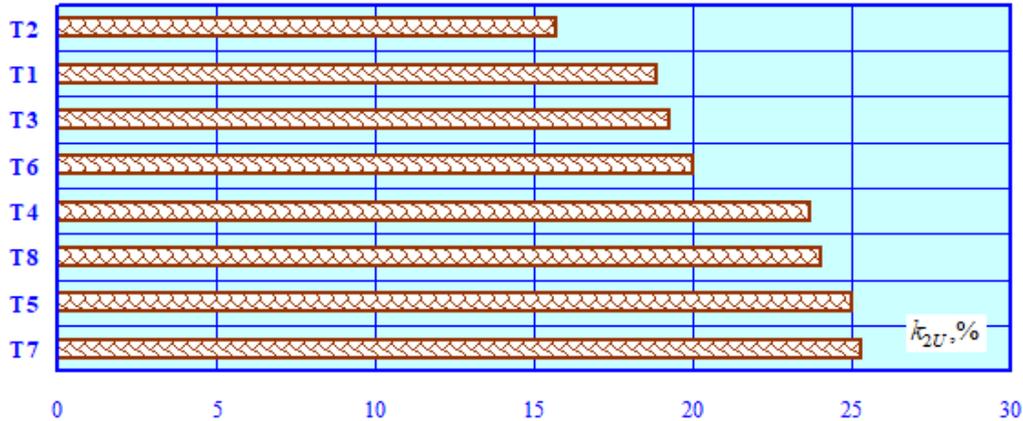
**Рис. 6.** Вариации коэффициентов несимметрии на шинах высокого напряжения тяговых подстанций (1 – типовая система тягового электроснабжения; 2 – система тягового электроснабжения с тяговыми трансформаторами по схеме открытого треугольника):  
а – ТП 1; б – ТП 8

**Fig. 6.** Variations of asymmetry coefficients on high voltage buses of traction substations (1 – typical traction power supply system; 2 – traction power supply system with traction transformers according to the open triangle scheme):  
а – TP 1; б – TP 8



**Рис. 7.** Максимальные значения коэффициентов несимметрии на шинах 220 кВ тяговых подстанций: 1 – типовая система тягового электроснабжения; 2 – система тягового электроснабжения с трансформаторами по схеме открытого треугольника

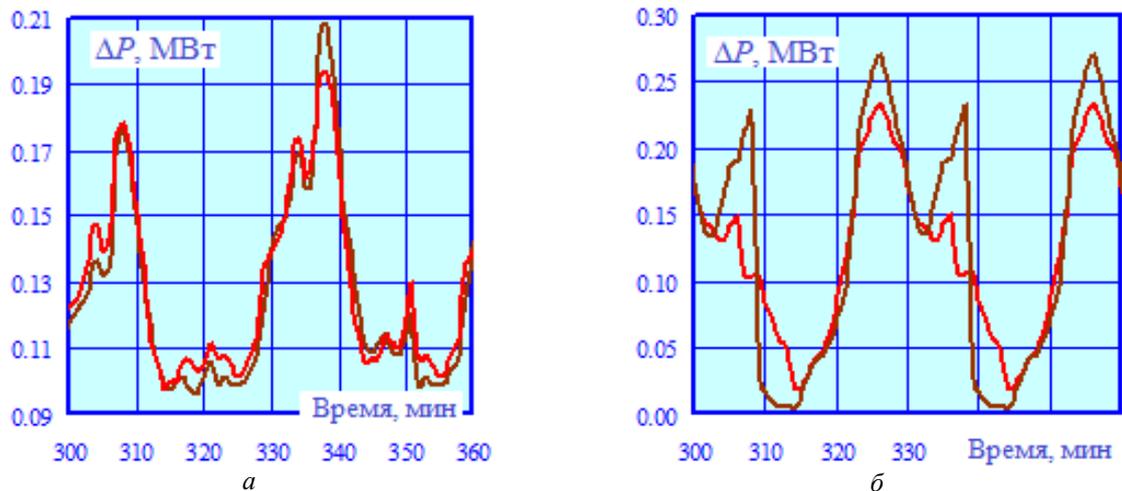
**Fig. 7.** Maximum values of asymmetry coefficients on 220 kV buses of traction substations: 1 – typical traction power supply system; 2 – traction power supply system with transformers by open triangle pattern



**Рис. 8.** Снижение максимальных значений несимметрии за счет использования трансформаторов с обмотками, соединенными в открытый треугольник  
**Fig. 8.** Reduction of maximum unbalance values through the use of transformers with windings connected into an open triangle

**Таблица 3.** Сводные показатели по потерям мощности, кВт  
**Table 3.** Summary indicators for power losses, kW

Показатель Indicator	Линия электропередач, связывающая Т 3 и Т 4 Power line linking T 3 and T 4			Тяговая сеть между ТП 3 и ТП 4 Traction circuit between TP3 and TP4		
	Типовая Typical	Тяговый трансформатор по схеме открытого треугольника Traction transformer by open triangle pattern	Различие, % Difference, %	Типовая Typical	Тяговый трансформатор по схеме открытого треугольника Traction transformer by open triangle pattern	Различие, % Difference, %
Среднее значение Average value	114,02	114,09	-0,06	70,59	73,99	-4,82
Максимум Maximum	209,00	194,00	7,18	232,00	269,00	-15,95



**Рис. 9.** Вариации потерь активной мощности в линии электропередач и тяговой сети:  
 а – линия электропередач, связывающая Т3 и Т4; б – тяговая сеть между ТП3 и ТП4  
**Fig. 9.** Variations in active power losses in power lines and traction networks:  
 а – power line connecting T3 and T4; б – traction network between TP3 and TP4

**Таблица 4.** Суммарные коэффициенты гармоник  $k_U$  на шинах 220 кВ тяговой подстанции (типичная система тягового электроснабжения), %**Table 4.** Total harmonic coefficients  $k_U$  on 220 kV busbars of traction substation (typical traction power supply system), %

№	Тяговая подстанция Traction substation	Фаза А Phase A		Фаза В Phase B		Фаза С Phase C	
		Среднее значение Average value	Максимум Maximum	Среднее значение Average value	Максимум Maximum	Среднее значение Average value	Максимум Maximum
1	ТП 1	8,57	21,61	6,42	12,24	7,95	20,28
2	ТП 2	8,25	20,84	6,18	11,83	7,74	19,73
3	ТП 3	9,03	22,92	6,81	13,21	8,6	22,15
4	ТП 4	9,34	23,7	7,17	14	9	23,45
5	ТП 5	9,31	23,67	7,21	13,99	8,99	23,41
6	ТП 6	8,95	22,77	6,9	13,2	8,54	22,02
7	ТП 7	8,14	20,59	6,3	11,83	7,67	19,53
8	ТП 8	8,43	21,3	6,56	12,22	7,91	20,07
9	<b>Максимум</b>	<b>9,34</b>	<b>23,7</b>	<b>7,21</b>	<b>14</b>	<b>9</b>	<b>23,45</b>

**Таблица 5.** Сводные данные по  $k_U$  на шинах 220 кВ тяговой подстанции (система тягового электроснабжения с тяговым трансформатором по схеме открытого треугольника), %**Table 5.** Summary of  $k_U$  on 220 kV busbars of a traction substation (traction power supply system with traction transformer according to the open triangle scheme), %

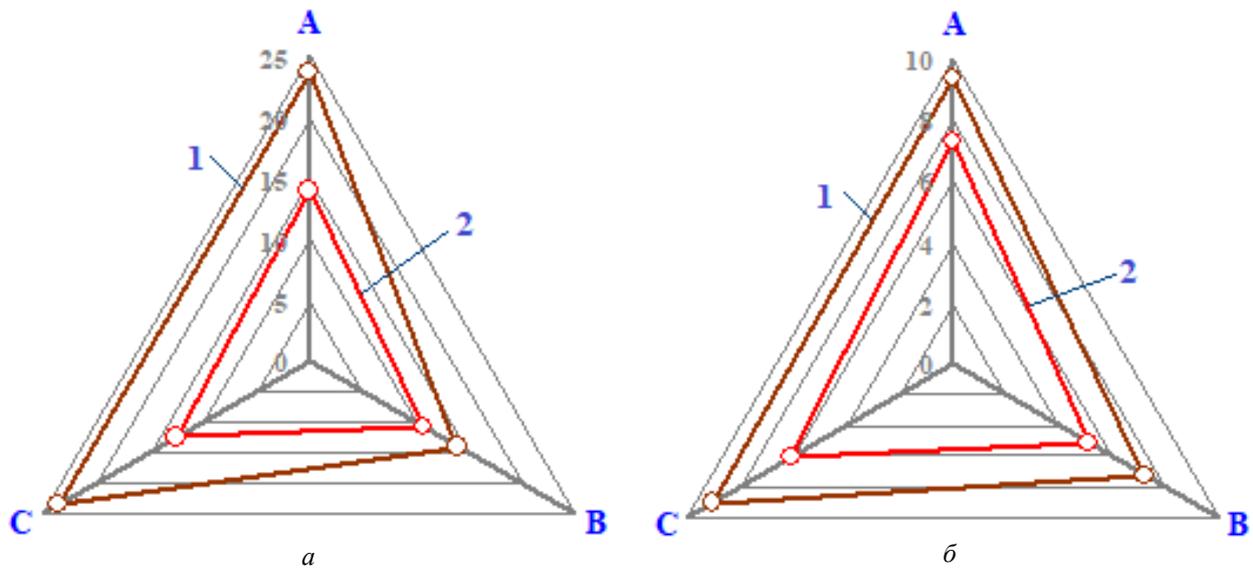
№	Тяговая подстанция Traction substation	Фаза А Phase A		Фаза В Phase B		Фаза С Phase C	
		Среднее значение Average value	Максимум Maximum	Среднее значение Average value	Максимум Maximum	Среднее значение Average value	Максимум Maximum
1	ТП 1	6,6	12,59	4,67	9,42	5,38	10,57
2	ТП 2	6,33	12,11	4,52	9,22	5,11	9,82
3	ТП 3	6,96	13,42	5,03	10,38	5,68	11,18
4	ТП 4	7,27	14,05	5,16	10,71	6,08	12,39
5	ТП 5	7,28	14,04	5,15	10,65	6,03	12,24
6	ТП 6	7	13,37	5,01	10,16	5,59	11,05
7	ТП 7	6,41	12,1	4,57	9,18	4,95	9,57
8	ТП 8	6,76	12,67	4,77	9,47	5,11	9,84
9	<b>Максимум</b>	<b>7,28</b>	<b>14,05</b>	<b>5,16</b>	<b>10,71</b>	<b>6,08</b>	<b>12,39</b>

На рис. 10 представлены диаграммы, отвечающие величинам  $\max(k_{U_{\max}})$  и  $\max(k_{U_{\text{mean}}})$ . Различия между этими показателями для типовой СТЭ и схемы с ТТ ОТ представлены в табл. 6. Максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ ТП показаны на графиках рис. 11.

Результаты расчета несинусоидальных режимов позволяют сделать вывод о том, что схема с ТТ ОТ обеспечивает снижение макси-

мумов суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ ТП на 22–47 % по сравнению с типовой СТЭ.

На рис. 12 показаны зависимости амплитуд напряженности магнитного поля на высоте 1,8 м для типовой ТС и СТЭ с ТТ ОТ. Из него видно, что за счет небольшого снижения напряжений в ТС в схеме с ТТ ОТ возрастают токи, что приводит к увеличению напряженностей магнитного поля.



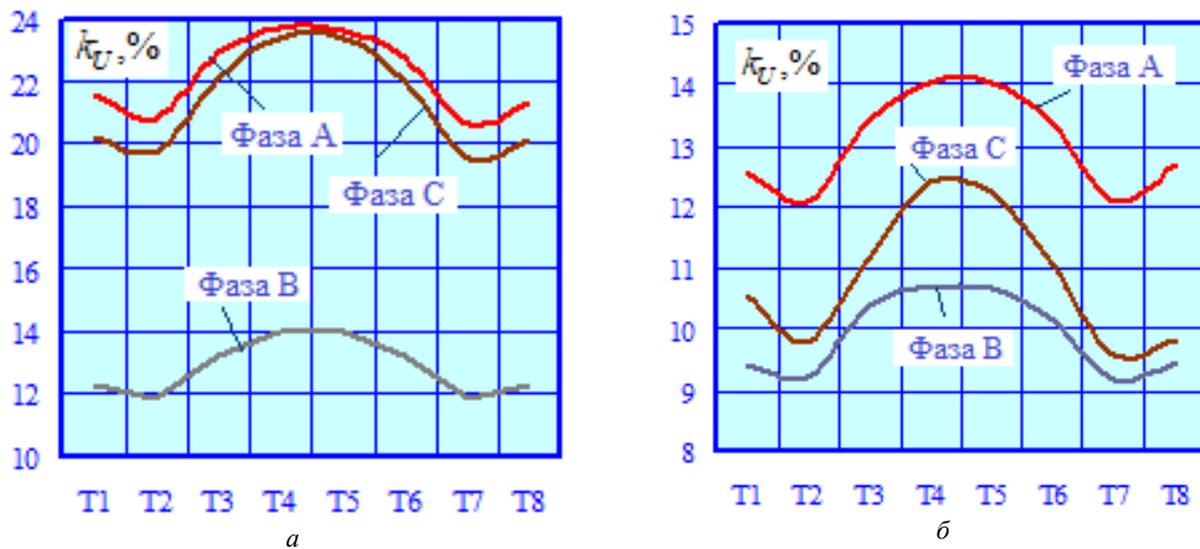
**Рис. 10.** Максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник по тяговой подстанции (1 – типовая система тягового электроснабжения 25 кВ; 2 – система тягового электроснабжения с трансформаторами по схеме открытого треугольника):

$a$  –  $\max(k_{U_{\max}})$ ;  $b$  –  $\max(k_{U_{\text{mean}}})$ ;  $k_{U_{\max}}$  – максимальное значение  $k_U$ ;  $k_{U_{\text{mean}}}$  – среднее значение  $k_U$

**Fig. 10.** Maximum values of total harmonic coefficients for traction substation

(1 – typical 25 kV traction power supply system; 2 – traction power supply system with open triangle transformers):

$a$  –  $\max(k_{U_{\max}})$ ;  $b$  –  $\max(k_{U_{\text{mean}}})$ ;  $k_{U_{\max}}$  is the maximum value of  $k_U$ ;  $k_{U_{\text{mean}}}$  – average value of  $k_U$



**Рис. 11.** Максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ тяговой подстанции:

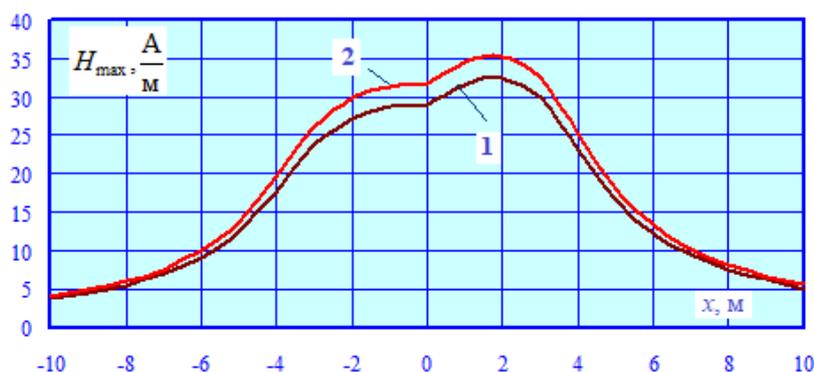
$a$  – типовая система тягового электроснабжения 25 кВ;  $b$  – система тягового электроснабжения с трансформаторами по схеме открытого треугольника

**Fig. 11.** The maximum values of the total harmonic coefficients at the 220 kV inputs of the traction substation:

$a$  – a typical 25 kV traction power supply system;  $b$  – traction power supply system with open triangle transformers

**Таблица 6.** Максимумы суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ тяговой подстанции  
**Table 6.** Maximum total harmonic coefficients at 220 kV inputs of traction substation

Фаза Phase	Значение Value	Система тягового электроснабжения Traction power supply system		Различие, % Difference, %
		Типовая Typical	Тяговый трансформатор по схеме открытого треугольника Open triangle traction transformer	
А	Среднее; Average	9,34	7,28	22,06
	Максимум Maximum	23,7	14,05	40,72
В	Среднее; Average	7,21	5,16	28,43
	Максимум Maximum	14	10,71	23,50
С	Среднее; Average	9	6,08	32,44
	Максимум Maximum	23,45	12,39	47,16



**Рис. 12.** Амплитуды напряженности магнитного поля на высоте 1,8 м для тяговой сети межподстанционной зоны между ТП 3 и ТП 4:

1 – типовая система тягового электроснабжения; 2 – система тягового электроснабжения с тяговым трансформатором по схеме открытого треугольника

**Fig. 12.** Amplitudes of the magnetic field strength at a height of 1.8 m for the traction circuit intersubstation zone between TS 3 and TS 4:

1 – typical traction power supply system; 2 – traction power supply system with open triangle traction transformer

## Заключение

Разработаны цифровые модели, обеспечивающие моделирование сложно несимметричных и несинусоидальных режимов системы тягового электроснабжения с трансформаторами по схеме ОТ. Результаты моделирования показали, что при снижении размеров движения по сравнению с данными, приведенными в работе [29], эффективность улучшения качества электроэнергии в схеме с ТТ ОТ возрастает. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности  $k_{2U}$  уменьшаются на 15–25 %. Максимумы суммарных коэффициентов гармоник на вводах 220 кВ ТП снижаются на 22–47 %.

Итоговые показатели по напряжениям на токоприемниках электровозов в обеих схемах

различаются на доли процентов, за исключением минимального напряжения четного поезда, которое в схеме ТТ ОТ ниже аналогичного показателя для типовой СТЭ примерно на 3 %.

В схеме с ТТ ОТ максимальные значения потерь в ЛЭП уменьшаются на 7 %, в ТС увеличиваются на 16 %. Из-за снижения напряжений в ТС в схеме с ТТ ОТ возрастают токи, что приводит к увеличению напряженностей магнитного поля.

Разработанные цифровые модели могут применяться на практике при выборе средств симметрирования на участках дорог с размерами движения, не достигающими пределов пропускной способности.

## Список литературы

1. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (smart grid) / Г.О. Арсентьев, Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков и др. Иркутск : ИрГУПС, 2019. 412 с.
2. Щегловитова Е.В. Несимметрия напряжений в системе тягового электроснабжения и технические решения для ее снижения // Молодой исследователь: вызовы и перспективы : сб. ст. по материалам ССЛXIII Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2022. Т. 21 (263). С. 335–340.
3. Родченко А.Д. Проблемы и задачи снижения несимметрии токов и напряжений системы тягового электроснабжения переменного тока // Электроснабжение железных дорог : межвуз. темат. сб. науч. тр. Омск, 2010. С. 28–30.
4. Осипов В.А., Боева А.И. Снижение коэффициента несимметрии в системе тягового электроснабжения переменного тока 27,5 кВ // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2015. № 2. С. 81–86.
5. Повышение работоспособности системы тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги / Н.П. Григорьев, И.В. Игнатенко, С.А. Власенко и др. // Вестн. Научно-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2022. Т. 81. № 3. С. 248–257.
6. Косарев А.Б., Алексеев М.В. Система тягового электроснабжения переменного тока с незначительным коэффициентом несимметрии по напряжению на первичной стороне силового тягового трансформатора // Вестн. Научно-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2015. № 1. С. 11–16.
7. Савина Н.В., Лисогурский И.А. Тяга переменного тока, как источник снижения эффективности и надежности функционирования электрических сетей // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Комсомольск-на-Амуре, 2021. С. 143–147.
8. Интеллектуальные преобразователи для симметрирования высокоскоростной электротяговой нагрузки / А.Т. Бурков, С.В. Кузьмин, В.В. Сероносков и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2015. № 2 (58). С. 116–121.
9. Сероносков В.В. Улучшение условий симметрирования трехфазных токовых нагрузок на тяговых подстанциях однопутных участков // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2006. № 4 (24). С. 123–127.
10. Манусов В.З., Морозов П.В. Снижение несимметрии в трехфазной сети, питающей двухфазную сеть тяговых подстанций скоростных железных дорог переменного тока // Докл. Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1-1 (25). С. 204–207.
11. Определение оптимального способа анализа электрических режимов и выбор средств снижения несимметрии напряжений в районах с высокой долей потребления электроэнергии тяговой нагрузкой / О.С. Стремиллова, И.М. Кац, В.В. Дикович и др. // Электроэнергетика глазами молодежи : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2017. Т. 2. С. 14–17.
12. Model for optimal balancing single-phase traction load based on Steinmetz's method / Q. Wan, M. Wu, J. Chen et al. // 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, 2010. P. 1565–1569. DOI 10.1109/ECCE.2010.5618084.
13. Optimal balancing of large single-phase traction load / Q. Wan, M. Wu, J. Chen et al. // IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010). Birmingham, 2010. P. 1–6. DOI 10.1049/ic.2010.0017.
14. Current balancing, reactive power and harmonic compensation using a traction power conditioner on electrified railway system / I. Maghsoud, A. Ghassemi, S. Farshad et al. // 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Mashhad, 2013. P. 1–6. DOI 10.1109/IranianCEE.2013.6599882.
15. A transformerless compensator used in traction substation for load balancing / C. Zhang, Y. Wei, Q. Jiang et al. // 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Weihai, 2011. P. 1490–1493. DOI 10.1109/DRPT.2011.5994132.
16. Research for the effects of high-speed electrified railway traction load on power quality / Yu-q. Liu, G.-p. Wu, H.-s. Hua et al. // 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Weihai, 2011. P. 569–573. DOI 10.1109/DRPT.2011.5993957.
17. Wang G., Ren E., Tian M. A Hybrid active compensation method for current balance based on Y/Δ 11 Connection Traction Transformer // Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System. Guangzhou, 2008. P. 582–586. DOI 10.1109/PEITS.2008.88.
18. A modular multilevel converter based Railway Power Conditioner for power balance and harmonic compensation in Scott railway traction system / S. Song, J. Liu, S. Ouyang et al. // IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei, 2016. P. 2412–2416. DOI 10.1109/IPEMC.2016.7512675.
19. The Unbalanced Modes Analyze Of Traction Loads Network / U. Bumtsend, M. Safaraliev, A. Ghulomzoda et al. // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Yekaterinburg, 2020. P. 0456–0459. DOI 10.1109/USBREIT48449.2020.9117758.
20. Blahnik V., Pittermann M., Straka M. Operating states of load balancer for ac traction substation based on CHB topology // IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). Gliwice, 2021. P. 272–277. DOI 10.1109/PEMC48073.2021.9432600.
21. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : ИрГУПС, 2005. 273 с.
22. А.с. № 418934 СССР. Схема однофазного энергоснабжения железной дороги от линии электропередачи / М. Б. Улановский. № 1738679/24-7 ; заявл. 12.01.1972 ; опубл. 05.03.1974, Бюл. № 9. 2 с.
23. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
24. Масенко А.В., Жестков В.В., Таразанов В.И. Электроснабжение потребителей по схеме «открытого треугольника» // Приднепровский научный вестник. 2023. Т. 1. № 3. С. 52–55.
25. Щebetеев В.А., Мищенко В.Р., Таразанов В.И. Оценка дополнительных потерь в схеме питания потребителей «открытым треугольником» // Приднепровский научный вестник. 2023. Т. 1. № 3. С. 63–65.
26. Надтока И.И., Осадчий П.В., Тропин В.В. Особенности применения схемы «открытый треугольник» в структуре сельской низковольтной распределительной сети // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 5. С. 72–78.

27. Попов Н.М., Канов А.Н. Моделирование в фазных координатах соединения двух однофазных трансформаторов в «открытый треугольник» // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве : труды V Междунар. науч.-техн. конф. Москва, 2006. Т. 1. С. 284–289.

28. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими трансформаторами. Иркутск : ИрГУПС, 2016. 164 с.

### References

1. Arsent'ev G.O., Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Kutsyi A.P., Nguen V.Kh., Cherepanov A.V., Chan Z.Kh. Upravlenie rezhimami sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog na osnove tekhnologii intellektual'nykh setei (smart grid) [Management of modes of railway power supply systems based on smart grid technologies]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2019. 412 p.

2. Shcheglovitova E.V. Nesimmetriya napryazhenii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya i tekhnicheskie resheniya dlya ee snizheniya [Voltage asymmetry in the traction power supply system and technical solutions for its reduction]. *Sbornik statei po materialam CCLXIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Molodoi issledovatel': vyzovy i perspektivy»* [Proceedings of the CCLXIII International Scientific and Practical Conference «Young Researcher: Challenges and Prospects»]. Moscow, 2022, vol. 21 (263), pp. 335–340.

3. Rodchenko A.D. Problemy i zadachi snizheniya nesimmetrii tokov i napryazhenii sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Problems and tasks of reducing the asymmetry of currents and voltages of the system of traction power supply of alternating current]. *Mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov «Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog»* [Inter-university proceedings «Electric supply of railways»]. Omsk, 2010, pp. 28–30.

4. Osipov V.A., Boeva A.I. Snizhenie koeffitsienta nesimmetrii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka 27,5 kV [Reduction of the asymmetry coefficient in the system of traction power supply of alternating current 27,5 kV]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University], 2015, no. 2, pp. 81–86.

5. Grigor'ev N.P., Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Kovalev V.A., Shatalov V.V. Povyshenie rabotosposobnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya Dal'nevostochnoi zheleznoi dorogi [Improving the efficiency of the traction power supply system of the Far Eastern Railway]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport], 2022, vol. 81, no. 3, pp. 248–257.

6. Kosarev A.B., Alekseenko M.V. Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s neznachitel'nyim koeffitsientom nesimmetrii po napryazheniyu na pervichnoi storone silovogo tyagovogo transformatora [Alternating current traction power supply system with a non-significant voltage asymmetry coefficient on the primary side of a power traction transformer]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport], 2015, no. 1, pp. 11–16.

7. Savina N.V., Lisogurskii I.A. Tyaga peremennogo toka, kak istochnik snizheniya effektivnosti i nadezhnosti funkcionirovaniya elektricheskikh setei [Alternating current traction as a source of reducing the efficiency and reliability of the functioning of electrical networks]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu»* [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference «Production technologies of the future: from creation to implementation»]. Komsomolsk-on-Amur, 2021, pp. 143–147.

8. Burkov A.T., Kuz'min S.V., Seronosov V.V., Stepanskaya O.A. Intellektual'nye preobrazovateli dlya simmetrirovaniya vysokoskorostnoi elektroyagovoi nagruzki [Intelligent converters for balancing high-speed electric traction load]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2015, no. 2 (58), pp. 116–121.

9. Seronosov V.V. Uluchshenie uslovii simmetrirovaniya trekhfaznykh tokovykh nagruzok na tyagovykh podstantsiyakh odnoputnykh uchastkov [Improving the conditions for balancing three-phase current loads at traction substations of single-track sections]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2006, no. 4 (24), pp. 123–127.

10. Manusov V.Z., Morozov P.V. Snizhenie nesimmetrii v trekhfaznoi seti, pitayushchei dvukhfaznyuyu set' tyagovykh podstantsii skorostnykh zheleznykh dorog peremennogo toka [Reduction of asymmetry in a three-phase network supplying a two-phase network of traction substations of high-speed AC railways]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], no. 1-1 (25), 2012, pp. 204–207.

11. Stremilova O.S., Kats I.M., Dikovich V.V., Zav'yalov P.B. Opredelenie optimal'nogo sposoba analiza elektricheskikh rezhimov i izbor sredstv snizheniya nesimmetrii napryazhenii v raionakh s vysokoi dolei potrebleniya elektroenergii tyagovoi nagruzkoj [Determining the optimal method for analyzing electrical modes and choosing means to reduce voltage unbalance in areas with a high share of electricity consumption by traction load]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi»* [Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference «Power industry through the eyes of youth»]. Samara, 2017, vol. 2, pp. 14–17.

12. Wan Qingzhu, Wu Mingli, Chen Jianye, Zhu Guiping. Model for optimal balancing single-phase traction load based on Steinmetz's method. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Atlanta, 2010, pp. 1565–1569. DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618084.

13. Wan Qingzhu, Wu Mingli, Chen Jianye, Zhu Guiping. Optimal balancing of large single-phase traction load. *IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010)*. Birmingham, 2010, pp. 1–6. DOI: 10.1049/ic.2010.0017.

14. Maghsoud I., Ghassemi A., Farshad S., Fazel S.S. Current balancing, reactive power and harmonic compensation using a traction power conditioner on electrified railway system. *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Mash-

had, 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IranianCEE.2013.6599882.

15. Zhang C., Wei Y., Jiang Q., Tong L. A transformerless compensator used in traction substation for load balancing. *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Weihai, 2011, pp. 1490–1493. DOI: 10.1109/DRPT.2011.5994132.

16. Liu Yu-q., Wu G.-p., Hua H.-s., Li W. Research for the effects of high-speed electrified railway traction load on power quality. *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. Weihai, 2011, pp. 569–573. DOI: 10.1109/DRPT.2011.5993957.

17. Wang G., Ren E., Tian M. A Hybrid Active Compensation Method for Current Balance Based on Y/ $\Delta$  11 Connection Traction Transformer. *2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System*. Guangzhou, 2008, pp. 582–586. DOI: 10.1109/PEITS.2008.88.

18. Song S., Liu J., Ouyang S., Chen X. A modular multilevel converter based Railway Power Conditioner for power balance and harmonic compensation in Scott railway traction system. *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*. Hefei, 2016, pp. 2412–2416. DOI: 10.1109/IPEMC.2016.7512675.

19. Bumtsend U., Safaraliev M., Ghulomzoda A., Ghoziev B., Ahyoev J., Ghulomabdolov G. The Unbalanced Modes Analyze Of Traction Loads Network. *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 2020, pp. 0456–0459. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117758.

20. Blahnik V., Pittermann M., Straka M. Operating States of Load Balancer for AC Traction Substation Based on CHB Topology. *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. Gliwice, 2021, pp. 272–277. DOI: 10.1109/PEMC48073.2021.9432600.

21. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complicated asymmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2005. 273 p.

22. Ulanovskii M.B. Copyright certificate SU 418934 A1, 05.03.1974.

23. Markvard K.G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [Power supply of electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1982. 528 p.

24. Masenko A.V., Zhestkov V.V., Tarazanov V.I. Elektrosnabzhenie potrebitelei po skheme «otkrytogo treugol'nika» [Power supply of consumers according to the «open triangle» scheme]. *Pridneprovskii nauchnyi vestnik* [Pridneprovsky Scientific Bulletin], 2023, vol. 1, no. 3, pp. 52–55.

25. Shchebetev V.A., Mishchenko V.R., Tarazanov V.I. [Estimation of additional losses in the scheme of supplying consumers with an «open triangle»]. *Pridneprovskii nauchnyi vestnik* [Pridneprovsky Scientific Bulletin], 2023, vol. 1, no. 3, pp. 63–65.

26. Nadtoka I.I., Osadchii P.V., Tropin V.V. Osobennosti primeniya skhemy «otkrytyi treugol'nik» v strukture sel'skoi nizkovol'tnoi raspredelitel'noi seti [Peculiarities of using the «open triangle» scheme in the structure of a rural low-voltage distribution network]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* [Bulletins of higher educational organizations. Electromechanics], 2020, vol. 63, no. 5, pp. 72–78.

27. Popov N.M., Kanov A.N. Modelirovanie v faznykh koordinatakh soedineniya dvukh odnofaznykh transformatorov v «otkrytyi treugol'nik» [Modeling in phase coordinates of the connection of two single-phase transformers into an «open triangle»]. *Trudy V Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom khozyaistve» (v 5 t.)* [Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference «Energy supply and energy saving in agriculture» (in 5 vol.)]. Moscow, 2006, vol. 1, pp. 284–289.

28. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh simmetriruyushchimi transformatorami [Modeling of traction power supply systems equipped with balancing transformers]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2016. 164 p.

### Информация об авторах

**Крюков Андрей Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: and\_kryukov@mail.ru.

**Черепанов Александр Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: smart\_grid@mail.ru.

**Серёдкин Дмитрий Александрович**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: dmitriy987@mail.ru.

**Фесак Илья Анатольевич**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: fesakilya@yandex.ru.

### Information about the authors

**Andrei V. Kryukov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University; Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: and\_kryukov@mail.ru.

**Alexandr V. Cherepanov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: smart\_grid@mail.ru.

**Dmitrii A. Seredkin**, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: dmitriy987@mail.ru.

**Ilya A. Fesak**, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: fesakilya@yandex.ru.

## Математическая модель асинхронного электродвигателя с учетом насыщения и нагрева

А.Э. Бирюков✉, Д.Г. Сорокин

ООО «Синара Алгоритм», г. Москва, Российская Федерация

✉BirukovAE@sinara-group.com

### Резюме

В статье представлена методика разработки математической модели асинхронного электродвигателя. Проведен анализ наиболее частых недостатков подобных моделей, основанных на эквивалентной Т-образной схеме замещения. К ним относятся не всегда применимые интерфейсные переменные (входные сигналы), а также пренебрежение намагничиванием стали сердечника и потерями в стали. Решение этих недостатков значительно расширит область применения рассматриваемых моделей, в частности позволит использовать их в системе управления асинхронным приводом, основанной на бездатчиковом методе управления. При таком подходе отсутствуют физические датчики температуры и скорости вращения ротора, сигналы с которых рассчитываются по косвенным параметрам. В связи с этим требуется учет нелинейных процессов, что повышает точность расчета. Показано, что среди существующих методов учета намагничивания электродвигателя предпочтительным является метод статических индуктивностей. Он представляет собой взаимную индукцию между статором и ротором в виде зависимости от тока намагничивания. Введение данной зависимости не сделает модель нелинейной, однако даст возможность провести более корректный расчет при минимуме дополнительных параметров. В то же время учет потерь в стали осуществляется за счет введения активного сопротивления параллельно цепи намагничивания. В работе подробно описывается разработка модели с теоретическим обоснованием использования тех или иных допущений и формул. Входные переменные модели ограничены тремя фазными напряжениями, скоростью вращения ротора и температурой внешнего воздуха. Данный набор может считаться минимально необходимым для использования модели в составе системы управления частотным асинхронным приводом. Наиболее чувствительны подобные системы управления к сопротивлению статорной обмотки электродвигателя, поэтому предложена методика расчета ее температуры на основе двухмассовой модели, которая рассматривает электродвигатель в двух частях: обмотки и сердечник с корпусом. В конце приведены расчет параметров эквивалентной схемы замещения на примере конкретного электродвигателя и результаты его моделирования.

### Ключевые слова

асинхронный электродвигатель, математическая модель, схема замещения асинхронного электродвигателя, термодинамическая модель, компьютерное моделирование

### Для цитирования

Бирюков А.Э. Математическая модель асинхронного электродвигателя с учетом насыщения и нагрева / А.Э. Бирюков, Д.Г. Сорокин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 58–76. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).58-76.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 30.08.2023 г.; поступила после рецензирования: 27.09.2023 г.; принята к публикации: 27.09.2023 г.

## Mathematical model of an induction machine with consideration of saturation and heating

A.E. Biryukov✉, D.G. Sorokin

LTD «Sinara Algorithm», Moscow, the Russian Federation

✉BirukovAE@sinara-group.com

### Abstract

The article discusses the methodology of development of a mathematical model of an asynchronous electric motor. The analysis of some disadvantages of such models, based on an equivalent T-shaped circuit scheme, is carried out. Among these are not always applicable interface variables (input signals), as well as neglect for core magnetization and losses in steel. Dealing with these drawbacks significantly expands the application area of the models considered allowing, in particular, to use them in asynchronous drive control systems based on a sensorless control method. This approach includes no physical sensors of temperature and rotor speed, the signals from which are calculated by indirect parameters. In this regard, it is necessary to take into account nonlinear processes, which increases the accuracy of the calculation. It is shown that among the existing methods of considering of the magnetization, the method of static inductances is preferable. It represents the mutual inductance between the stator and the rotor as a dependency on magnetizing current. The introduction of this dependence will not make the model nonlinear, but it gives a more correct calculation with a minimum of additional parameters. At the same time, losses in steel are accounted for by introducing an active resistance in

parallel to the magnetization circuit. This paper provides a detailed description of the development of the model with a theoretical justification for the use of certain assumptions and equations. The input variables of the model are limited by three phase voltages, the speed of rotation of the rotor and the temperature of the outside air. This set can be considered the minimum necessary for using the model as part of a frequency asynchronous drive control system. Such control systems are most sensitive to the resistance of the stator winding of the electric motor. Therefore, a method for calculating its temperature is proposed based on a two-mass model that considers an electric motor in the form of two parts: windings and a core with a casing. At the end of the work, the calculation of the parameters of the equivalent substitution circuit is given on the example of a specific electric motor with the results of its modeling.

### Keywords

induction machine, mathematical model, equivalent circuit scheme of induction machine, thermodynamic model, computer modeling

### For citation

Biryukov A.E., Sorokin D.G. Matematicheskaya model' asinkhronnogo elektrodvigatelya s uchedom nasyshcheniya i nagreva [Mathematical model of an induction machine with consideration of saturation and heating]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 58–76. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).58-76.

### Article info

Received: August 30, 2023; Revised: September 27, 2023; Accepted: September 27, 2023.

### Введение

Объектом исследования является асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Он получил широкое распространение в отрасли железнодорожной техники благодаря своим характеристикам [1–3]. К его основным достоинствам относятся:

- достижение номинальной мощности на широком диапазоне скоростей;
- высокое отношение мощности к габаритам электродвигателя;
- низкое содержание дорогостоящих и экологически вредных материалов;
- относительно низкая стоимость сервисного обслуживания [1].

Также данный тип электродвигателей отличается высокой надежностью. Это обусловлено отсутствием механического контакта между статором и ротором, что исключает трение.

Создание математической модели асинхронного электродвигателя (ММАЭД) требуется для совершенно разных целей. Наиболее часто она используется при разработке систем управления частотным приводом. Модели также выступают в качестве объекта виртуального тестирования [4, 5], либо в самом составе системы управления [6, 7]. Например, для расчета скорости вращения ротора и температуры для бездатчикового типа управления. Кроме того, ММАЭД встречаются при анализе неисправностей [8–10]. Описанные выше варианты применения ММАЭД относятся к одномерному моделированию. Под одномерной моделью понимается такая модель, параметры которой зависят только от одной переменной. Как правило,

этой переменной выступает время, и такую модель называют динамической.

С развитием технологий появляются все более комплексные и уникальные модели под специфические задачи [11, 12]. При разработке самого асинхронного электродвигателя чаще используют трехмерные модели, основанные на методах конечных элементов или конечных объемов. В первом случае исследуются электромагнитные и механические процессы, а также тепловые потери. Во втором случае исследуется теплообмен при вынужденном конвективном охлаждении. Однако подобные модели не рассматриваются в рамках этой статьи.

Как было сказано ранее, ММАЭД широко применяется при разработке управляемых частотных приводов. Корректность их работы чувствительна к ряду параметров, в частности к скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя и сопротивлению его статорной обмотки. Они легко могут быть найдены при наличии датчика частоты вращения ротора (или скорости подвижного состава при известном передаточном отношении) и температуры. Однако не всегда возможно установить соответствующие датчики. В этом случае рассчитать приблизительное значение возможно при помощи ММАЭД на основе косвенных сигналов (линейные напряжения, токи и др.) [4, 13]. Целью статьи является разработка ММАЭД, осуществляющей расчет температуры статорной обмотки и скорости вращения ротора.

Множество моделей создано на данный момент по одному подобию, поэтому они имеют схожие недостатки. К ним можно отнести не

всегда применимые интерфейсные переменные (входные сигналы), представление целого двигателя в виде однородного тела для расчета температуры, а также пренебрежение потерями в стали и намагничиванием стали сердечника.

Для учета намагниченности широко используются два метода: статических индуктивностей и динамических индуктивностей [13]. В первом случае индуктивности рассеяния статора и ротора считаются постоянными, в то время как насыщение магнитопровода проявляется в изменении коэффициента взаимной индукции от тока намагничивания. Такая модель на самом деле остается линейной обобщенной моделью электрической машины, но с переменной индуктивностью. Второй подход является более сложным и применяется реже, однако анализ показывает близость результатов подходов [14].

Потери в стали складываются из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи. Для их расчета используются следующие методы:

- введение двух контуров вихревых токов (дополнительные два контура, помимо статора и ротора);
- введение в систему уравнений Парка – Горева угла потерь;
- введение дополнительных сопротивлений параллельно или последовательно цепи намагничивания;
- введение коэффициентов потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи;
- введение активно-индуктивной нагрузки параллельно цепи намагничивания.

Каждый из подходов требует расчета значений дополнительных параметров.

Перечисленные методики учета намагничивания стали сердечника и потерь в них являются достаточно сложными, что ограничивает их практическое применение. Однако наименее трудоемкими могут считаться метод статических индуктивностей и метод введения сопротивления потерь в стали параллельно цепи намагничивания эквивалентной Т-образной схемы замещения. Они позволяют добиться большей точности и требуют расчета минимум дополнительных параметров.

### Разработка математической модели

Математическое описание асинхронного электродвигателя основано на анализе эквивалентной схемы замещения (рис. 1) [6, 15].

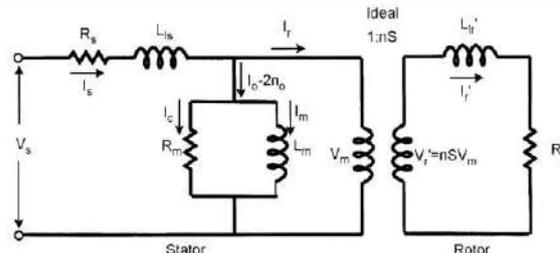


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения одной фазы асинхронного электродвигателя

Fig. 1. Equivalent replacement circuit scheme of one phase of an asynchronous electric motor

Поскольку ротор вращается с некоторой частотой, вторичная обмотка трансформатора (см. рис. 1) также вращается в пространстве. Из-за этого в обмотке ротора ток возбуждается на частоте скольжения. Чтобы обойти ограничение расчета точной величины скольжения, эта схема модифицируется (рис. 2). На ней ротор приведен к обмотке статора без использования трансформатора.

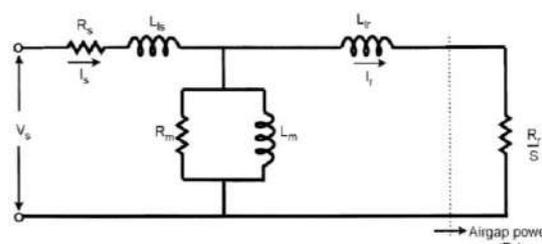


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения, приведенная к статору

Fig. 2. Equivalent replacement circuit scheme with respect to the stator

На рис. 2 используются следующие переменные:  $L_{ls}$  – индуктивность рассеяния статора;  $R_r$  – сопротивление ротора;  $L_{lr}$  – индуктивность рассеяния ротора;  $R_m$  – сопротивление стали;  $L_m$  – индуктивность намагничивания;  $s$  – скольжение. Для того чтобы их определить, нужно воспользоваться исходными данными на электродвигатель (табл. 1) и одним из алгоритмов расчета [16, 17].

В качестве объекта моделирования был выбран электродвигатель серии АИР. Двигатели из этой серии предназначены для привода машин и механизмов общепромышленного назначения. Для работы в составе частотно-регулируемого привода выпускаются двигатели серии АЧДР, однако их характеристики близки к двигателям серии АИР (табл. 1). На последние можно найти

**Таблица 1.** Сравнение технических характеристик электродвигателей серии АИР и АЧДР  
**Table 1.** Comparison of technical characteristics of electric motors of AIR and ACHDR series

Наименование характеристики Characteristic name	Серия двигателя Engine series	
	АИР	АЧДР
Высота осей вращения, мм Height of rotation axes, mm	50–355	56–355
Диапазон мощности, кВт Power range, kW	0,19–315	0,18–250
Синхронная частота вращения, об./мин. Synchronous rotation speed, rpm	750, 1 000, 1 500, 3 000	750, 1 000, 1 500, 3 000
Номинальное напряжение, В Rated voltage, V	220/380, 380/660, 220, 380, 660	380
КПД, % Efficiency, %	53–94,5	Нет данных
Коэффициент мощности, о.е. Power factor, p.u.	0,61–0,93	0,6–0,93
Исполнение Execution	Открытые, защищенные, закрытые, обдуваемые, продуваемые Open, protected, closed, ventilated, purged	Защищенные, закрытые, обдуваемые Protected, closed, ventilated

достоверную информацию о технических данных и габаритных размерах [18].

Математическую модель электродвигателя можно условно разделить на две структурные части. В одной производится расчет электрических параметров: напряжения, токов, потокосцепления, потоков и др., в другой – расчет тепловых параметров: температуры, теплового потока и др.

Характеристики выбранного электродвигателя приведены в табл. 2.

Анализ работы тягового электродвигателя (ТЭД) проще проводить во вращающейся системе координат ( $d$ ,  $q$ ), привязанной к полю ротора либо самому ротору. Тогда уравнения, описывающие напряжения в статоре и роторе по каж-

дой из осей, выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} V_{sd} = I_{sd}R_s + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_e \Psi_{sq}; \\ V_{sq} = I_{sq}R_s + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} - \omega_e \Psi_{sd}; \\ 0 = I_{rd}R_r + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} - (\omega_e - \omega_r)\Psi_{rq}; \\ 0 = I_{rq}R_r + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} - (\omega_e - \omega_r)\Psi_{rd}, \end{cases}$$

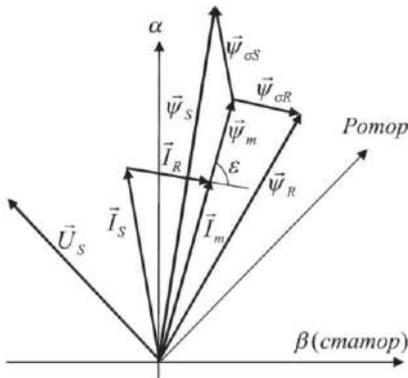
где  $V_{sd}$  и  $V_{sq}$  – проекции входного напряжения статора на ось  $d$  и  $q$  соответственно;  $I_{sd}$  и  $I_{sq}$  – проекции тока ветви статора на ось  $d$  и  $q$ ;  $\Psi_{sd}$  и  $\Psi_{sq}$  – проекции потокосцепления статора на ось  $d$  и  $q$ ;  $\omega_e$  – скорость вращения выбранной системы координат;  $I_{rd}$  и  $I_{rq}$  – проекции тока ротора на ось  $d$  и  $q$ ;  $\Psi_{rd}$  и  $\Psi_{rq}$  – проекции потокос-

**Таблица 2.** Характеристики выбранного для виртуального моделирования электродвигателя  
**Table 2.** Characteristics of the chosen for virtual modelling electric motor

Параметр Parameter	Значение Value
Тип электродвигателя Engine type	АИР180М6
Номинальная мощность, кВт Rated power, kW	18,5
Номинальная частота вращения, об. / мин Rated rotation speed, rpm	975
КПД, % Efficiency, %	90
Коэффициент мощности, о.е. Power factor, p.u	0,85
Номинальный ток при напряжении питания 380 В, А Rated current at supply voltage 380 V, A	37
Номинальный момент, Н·м Nominal moment, N·m	182
Кратность пускового момента, о.е. Multiplicity of starting torque, p.u.	2
Кратность пускового тока, о.е. Multiplicity of starting current, p.u.	6,5
Кратность максимального момента, о.е. Maximum torque multiplicity, p.u.	2,7
Динамический момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup> Dynamic moment of inertia of the rotor, kg·m <sup>2</sup>	0,24
Масса электродвигателя, кг Electric motor mass, kg	180
Длина электродвигателя, м Electric motor length, m	0,57
Диаметр электродвигателя, м Electric motor diameter, m	0,375

цепления ротора на ось  $d$  и  $q$ ;  $\omega_r$  – скорость вращения ротора.

Вектор вращающегося поля намагничивания вращается коллинеарно вращающемуся вектору тока намагничивания [19], который получается векторным сложением векторов тока статора и ротора (рис. 3). Во время работы асинхронного двигателя все векторы вращаются в плоскости поперечного сечения асинхронного двигателя вокруг оси вращения ротора. В установившемся режиме (при неизменной скорости и моменте нагрузки) амплитуды, фазовые сдвиги и скорости всех векторов состояний остаются постоянными. В динамике во время переходных процессов амплитуды векторов состояний и фазовые сдвиги между ними меняются.

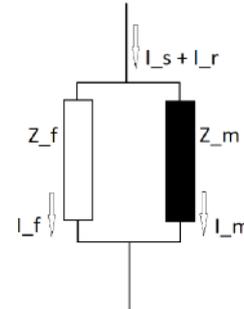


**Рис. 3.** Связь между токами и потокосцеплениями асинхронного электродвигателя  
**Fig. 3.** Relation between current and flux linkages of an asynchronous motor

Как было сказано ранее, потери в стали будут заданы при помощи введения дополнительного активного сопротивления параллельно цепи намагничивания (рис. 4). Данный подход требует расчета только одного сосредоточенного параметра: сопротивления стали. Это возможно сделать по результатам экспериментов или методике расчета параметров эквивалентной схемы замещения. В этом случае сумма векторов тока статора и ротора равна сумме векторов тока намагничивания и потерь в стали (см. рис. 1). Их соотношение легко определить через отношение импедансов при параллельном соединении сопротивлений:

$$\begin{cases} I_f Z_f = I_m Z_m; \\ Z_f = R_f; \\ Z_m = 2\pi f_V \cdot L_m, \end{cases}$$

где  $Z_f$  – полное сопротивление железа сердечника;  $Z_m$  – полное сопротивление намагничивания;  $R_f$  – активное сопротивление стали;  $f_V$  – основная частота напряжения питания.



**Рис. 4.** Распределение токов намагничивания и потерь в стали  
**Fig. 4.** Distribution of magnetizing and loss currents in steel

Связь между проекциями вращающегося вектора тока намагничивания и потокосцеплениями обеспечивается коэффициентами индуктивности (см. рис. 3):

$$\begin{cases} \vec{I}_m = \vec{I}_s + \vec{I}_r - \vec{I}_f; \\ \vec{\Psi}_s = \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{s\sigma}; \\ \vec{\Psi}_r = \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{r\sigma}; \\ \vec{\Psi}_m = L_m \vec{I}_m; \\ \vec{\Psi}_{s\sigma} = L_{s\sigma} \vec{I}_s; \\ \vec{\Psi}_{r\sigma} = L_{r\sigma} \vec{I}_r; \\ \vec{M} = \frac{3}{2} p \cdot \vec{I}_r \times \vec{\Psi}_m, \end{cases}$$

где  $\vec{I}_m$  – вектор тока намагничивания;  $\vec{I}_s$  – вектор тока статора;  $\vec{I}_r$  – вектор тока ротора;  $\vec{I}_f$  – вектор тока стали;  $\vec{\Psi}_s$  – вектор потокосцепления статора;  $\vec{\Psi}_m$  – вектор потокосцепления намагничивания;  $\vec{\Psi}_{s\sigma}$  – вектор потока рассеяния статора;  $\vec{\Psi}_r$  – вектор потокосцепления ротора;  $\vec{\Psi}_{r\sigma}$  – вектор потока рассеяния ротора;  $\vec{M}$  – электромагнитный момент.

Следует обратить внимание, что в последней формуле используется векторное произведение векторов тока ротора и потокосцепления намагничивания. Направление момента перпендикулярно им.

Для построения модели электродвигателя используется следующая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{sd} = \int \left[ V_{sd} - \frac{\Psi_{sd} - \Psi_{md}}{L_{s\sigma}} R_s + \omega_e \Psi_{sq} \right]; \\ \Psi_{sq} = \int \left[ V_{sq} - \frac{\Psi_{sq} - \Psi_{mq}}{L_{s\sigma}} R_s + \omega_e \Psi_{sd} \right]; \\ \Psi_{rd} = \int \left[ -\frac{\Psi_{rd} - \Psi_{md}}{L_{r\sigma}} R_r + (\omega_e - \omega_r) \Psi_{rq} \right]; \\ \Psi_{rq} = \int \left[ -\frac{\Psi_{rq} - \Psi_{mq}}{L_{r\sigma}} R_r - (\omega_e - \omega_r) \Psi_{rd} \right]; \\ \Psi_{md} = \frac{1}{\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{s\sigma}} + \frac{1}{L_{r\sigma}}} \left( \frac{\Psi_{sd}}{L_{s\sigma}} + \frac{\Psi_{rd}}{L_{r\sigma}} - I_{fd} \right); \\ \Psi_{mq} = \frac{1}{\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{s\sigma}} + \frac{1}{L_{r\sigma}}} \left( \frac{\Psi_{sq}}{L_{s\sigma}} + \frac{\Psi_{rq}}{L_{r\sigma}} - I_{fq} \right); \\ I_{sd} = \frac{\Psi_{sd} - \Psi_{md}}{L_{s\sigma}}; \\ I_{sq} = \frac{\Psi_{sq} - \Psi_{mq}}{L_{s\sigma}}; \\ I_{rd} = \frac{\Psi_{rd} - \Psi_{md}}{L_{r\sigma}}; \\ I_{rq} = \frac{\Psi_{rq} - \Psi_{mq}}{L_{r\sigma}}; \\ I_{md} = \frac{I_{sd} + I_{rd}}{1 + \frac{\omega_e L_m}{R_f}}; \\ I_{mq} = \frac{I_{sq} + I_{rq}}{1 + \frac{\omega_e L_m}{R_f}}; \\ I_{fd} = \frac{I_{sd} + I_{rd}}{1 + \frac{R_f}{\omega_e L_m}}; \\ I_{fq} = \frac{I_{sq} + I_{rq}}{1 + \frac{R_f}{\omega_e L_m}}; \\ M = \frac{3}{2} p \cdot (I_{sq} \Psi_{sd} - I_{sd} \Psi_{sq}), \end{array} \right.$$

где  $\Psi_{md}$  и  $\Psi_{mq}$  – проекции потокосцепления намагничивания на ось  $d$  и  $q$ ;  $I_{fd}$  и  $I_{fq}$  – проекции тока потерь в стали на ось  $d$  и  $q$ ;  $I_{md}$  и  $I_{mq}$  – проекции тока намагничивания на ось  $d$  и  $q$ .

На рис. 5–12 приведены структурные схемы блоков-функций, осуществляющих вычисление переменных из уже представленной системы уравнений. Для параметризации модели были введены следующие обозначения:

- префиксы conIm и callm обозначают параметры электродвигателя;
- префиксы varIm обозначают переменные, связанные с электродвигателем.

Далее идет именование самого параметра или переменной в соответствии с введенными ранее обозначениями.

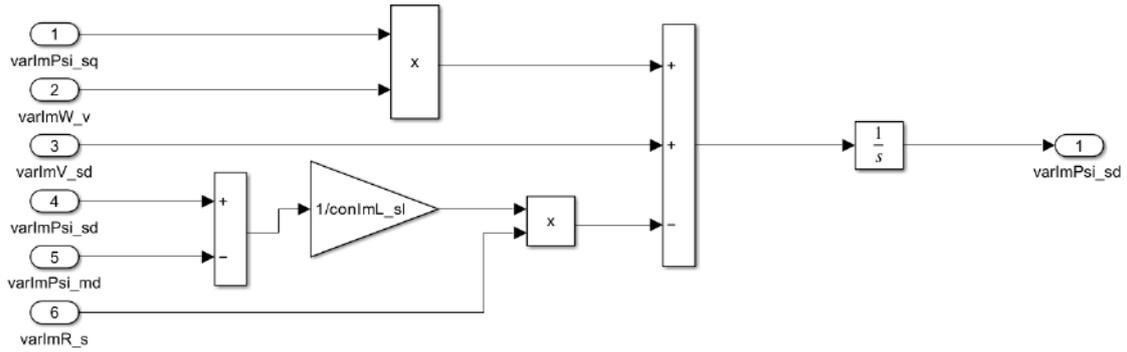
Уравнения для нахождения проекций тока намагничивания требуются для включения зависимости взаимной индукции от тока намагничивания:

$$L_m = f\left(\sqrt{I_{md}^2 + I_{mq}^2}\right).$$

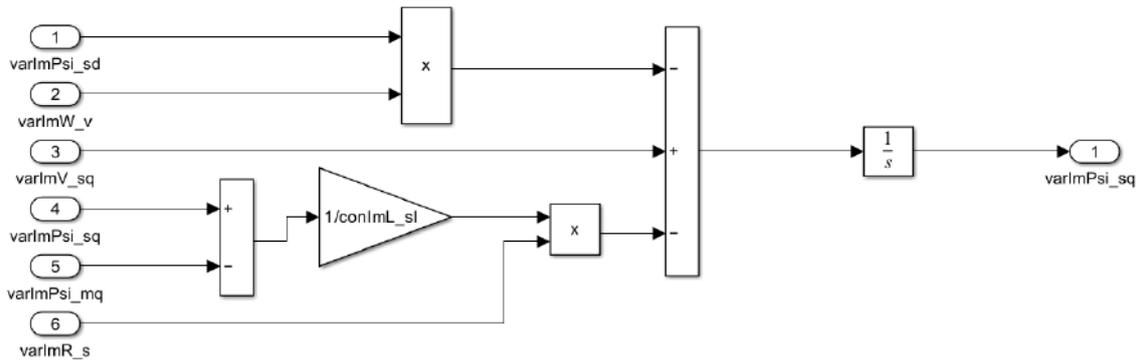
Использование подобной зависимости относится к методу статических индуктивностей, который упоминался ранее. Характерный вид зависимости взаимной индукции от тока намагничивания приведен на рис. 13.

Здесь  $|\tilde{\Psi}_m|$  – амплитуда потокосцепления намагничивания;  $L'_m$  – переменная взаимной индукции асинхронного электродвигателя.

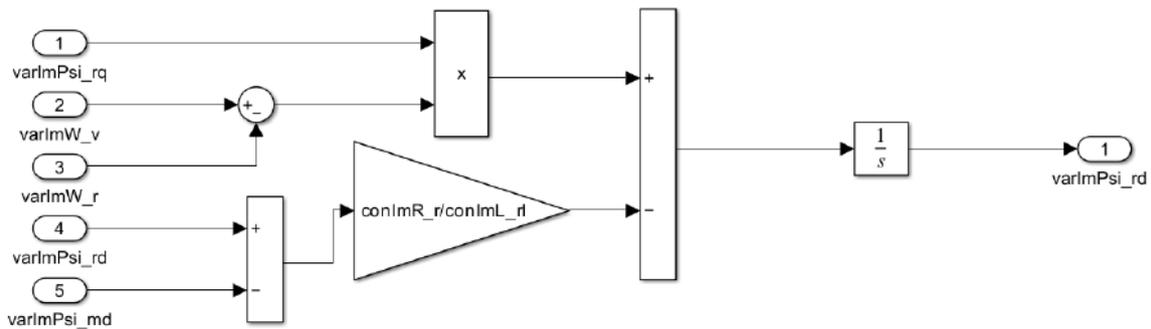
Как видно, взаимная индукция уменьшается с ростом тока намагничивания. При допущении, что форма кривой взаимной индукции близка для двигателей с разными характеристиками, ее удобнее задать как нормированную функцию. Это значит, что при низком токе намагничивания функция возвращает максимальное значение – единицу, которое на выходе из функции умножается на значение взаимной индукции, рассчитанное для конкретного электродвигателя (рис. 14).



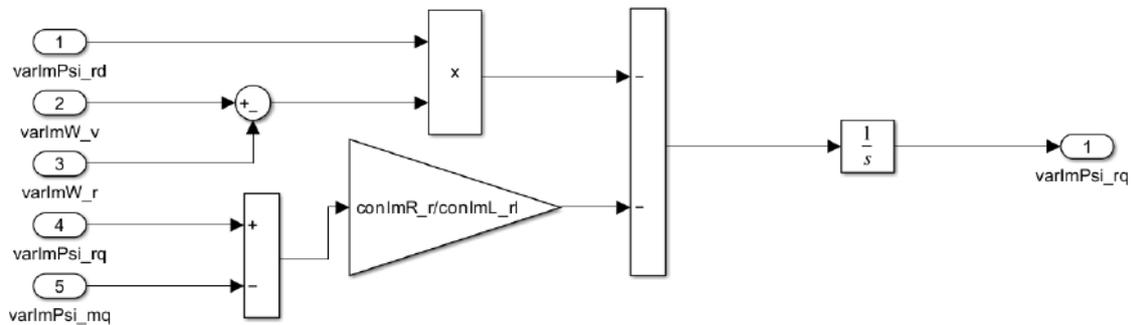
а



б

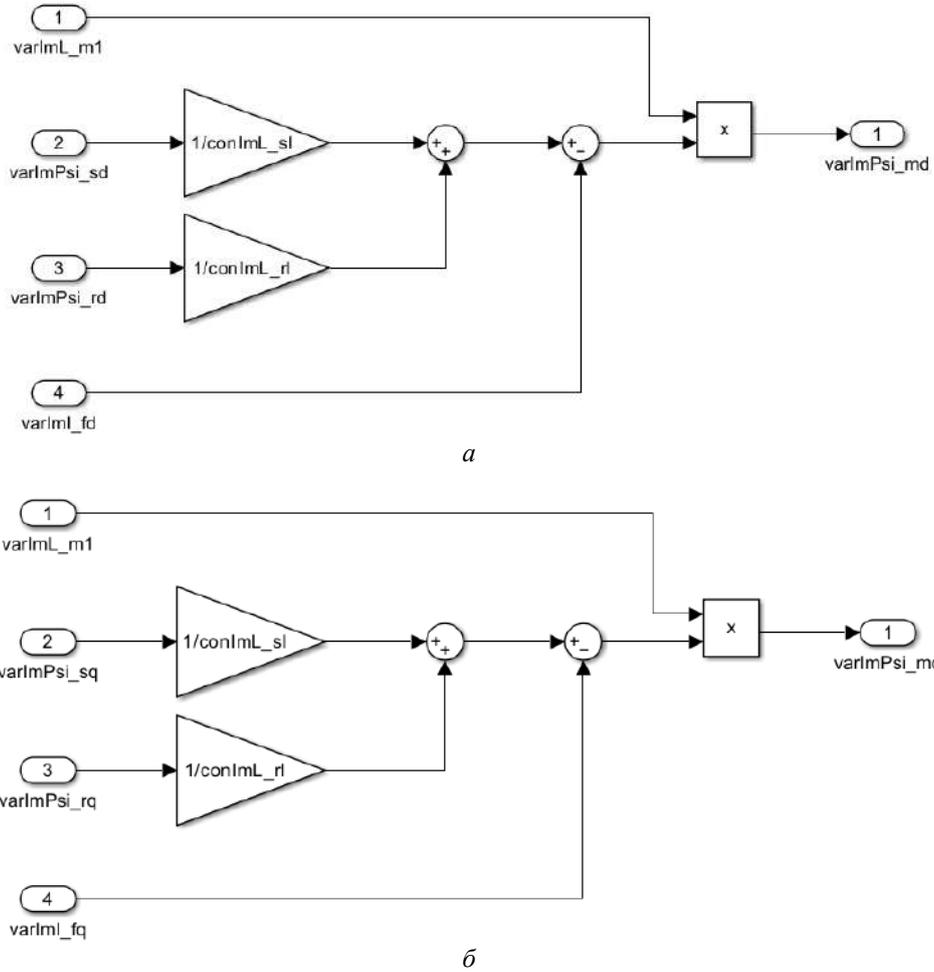
Рис. 5. Функция вычисления проекции потокосцепления статора на ось  $d$  (а) и  $q$  (б)Fig. 5. Function of calculating the projection of the stator's flux linkage onto the  $d$  (a)  $q$  (b) axis

а

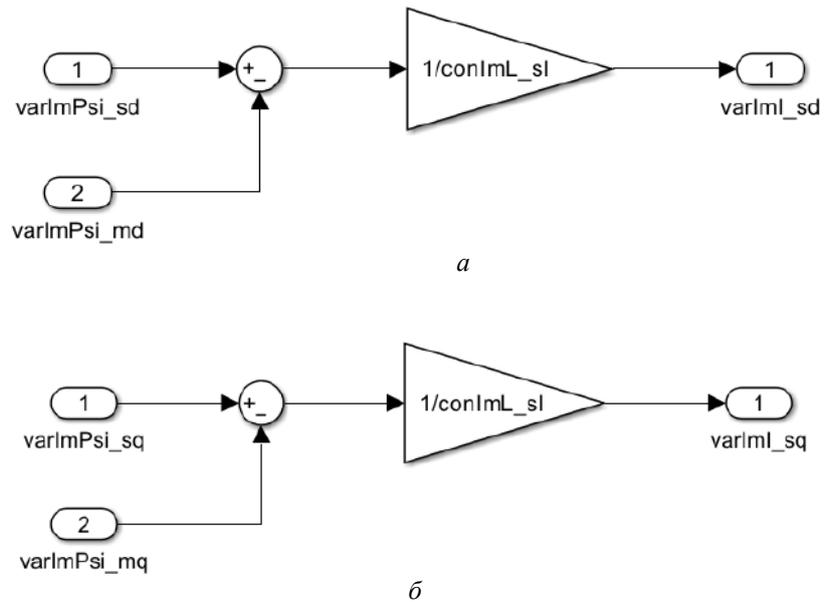


б

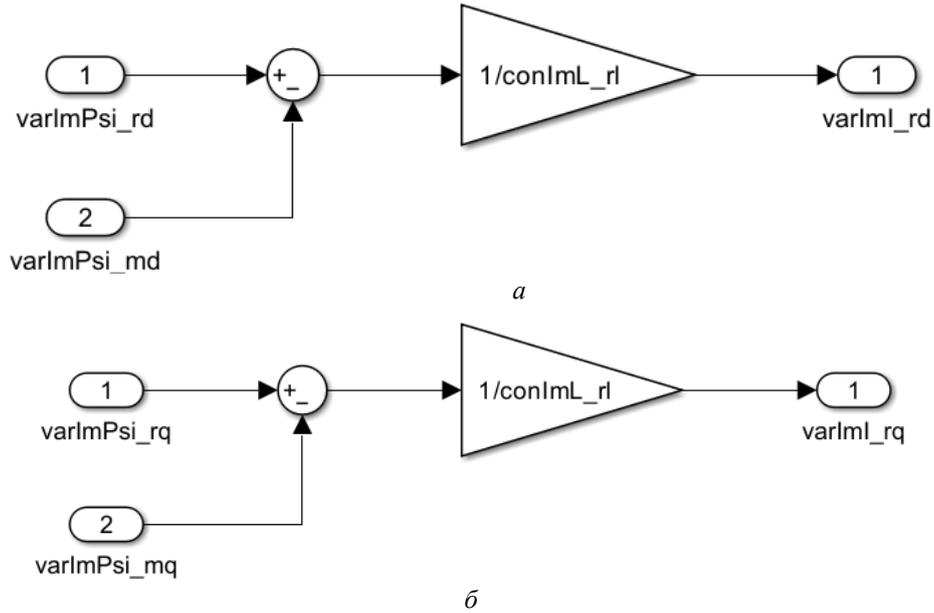
Рис. 6. Функция вычисления проекции потокосцепления ротора на ось  $d$  (а) и  $q$  (б)Fig. 6. Function of calculating the projection of the rotor's flux linkage onto the  $d$  (a)  $q$  (b) axis



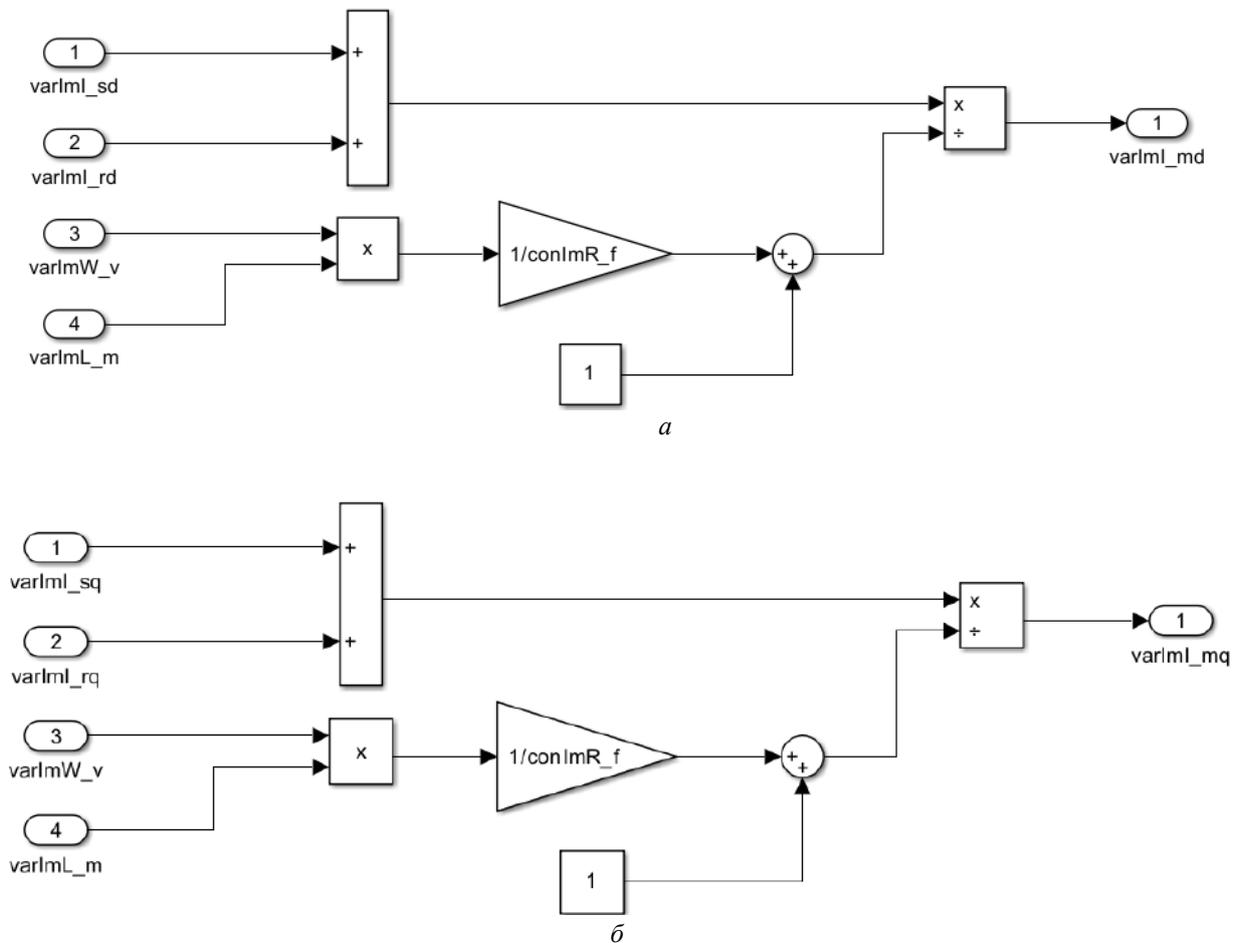
**Рис. 7.** Функция вычисления проекции потокосцепления намагничивания на ось  $d$  (а) и  $q$  (б)  
**Fig. 7.** Function of calculating the projection of the magnetizing flux linkage onto the  $d$  (a)  $q$  (b) axis



**Рис. 8.** Функция вычисления проекции тока статора на ось  $d$  (а) и  $q$  (б)  
**Fig. 8.** Function of calculating the projection of the stator's current onto the  $d$  (a)  $q$  (b) axis



**Рис. 9.** Функция вычисления проекции тока ротора на ось  $d$  (а) и  $q$  (б)  
**Fig. 9.** Function of calculating the projection of the rotor's current onto the  $d$  (a)  $q$  (b) axis



**Рис. 10.** Функция вычисления проекции тока намагничивания на ось  $d$  (а) и  $q$  (б)  
**Fig. 10.** Function of calculating the projection of the magnetizing current onto the  $d$  (a)  $q$  (b) axis

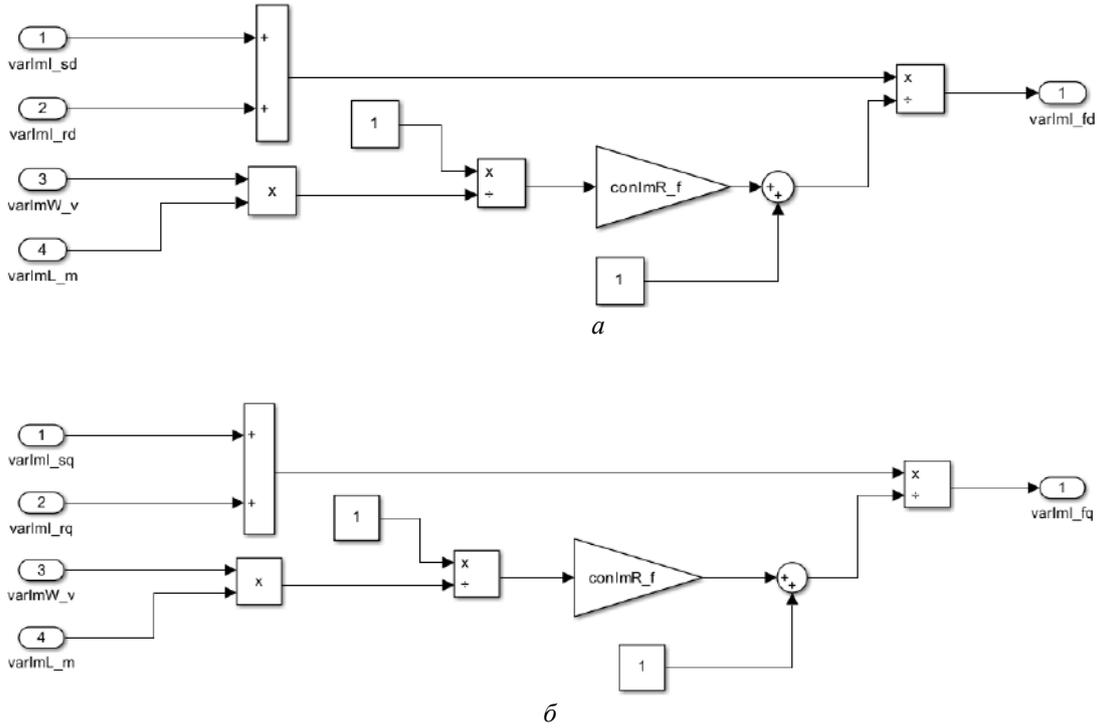


Рис. 11. Функция вычисления проекции тока потерь в стали на ось  $d$  (а) и  $q$  (б)  
 Fig. 11. Function of calculating the projection of the loss current onto the  $d$  (a)  $q$  (b) axis

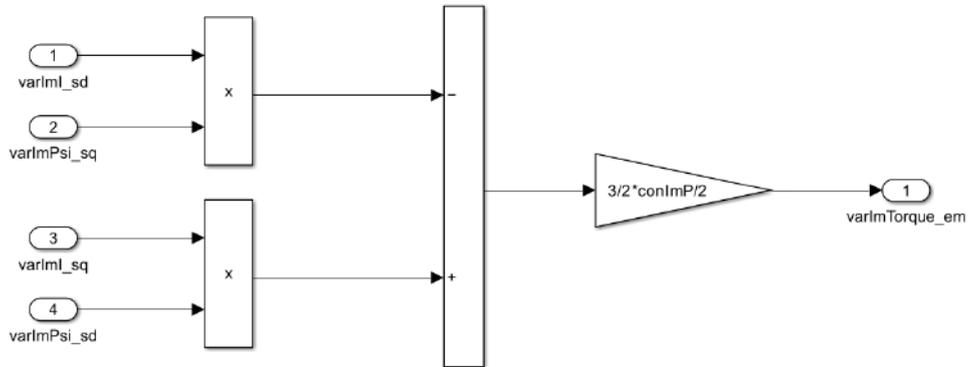


Рис. 12. Функция вычисления электромагнитного момента  
 Fig. 12. Function of calculating the electromagnetic torque

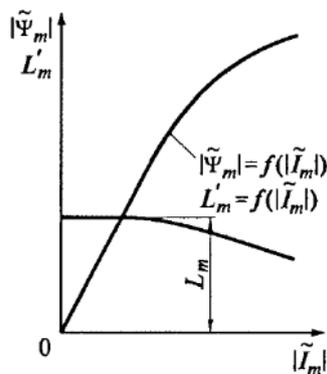


Рис. 13. Характеристика насыщения магнитной системы асинхронного двигателя  
 Fig. 13. Saturation curve of the magnetic system of an asynchronous motor

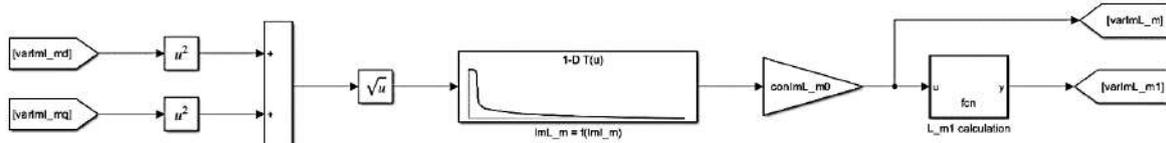


Рис. 14. Функция вычисления взаимоиндукции  
Fig. 14. Function of calculating inter-induction

Характерный вид функции нормированной взаимоиндукции от тока намагничивания определяется маркой стали, используемой в сердечнике.

Также ММАЭД должна быть дополнена функцией расчета сопротивления статора, которое меняется в зависимости от температуры обмотки. Его значение передается в блоки-функции расчета потокосцепления статора (см. рис. 5). Для этого требуется корректно задать условия нагрева и охлаждения электродвигателя. Нагрев происходит из-за тепловых потерь при протекании тока через проводники (ток статора и ток ротора):

$$Q = Q_{\text{нагрев}} - Q_{\text{охлаждение}} = CM\Delta T,$$

где  $Q$  – общее количество теплоты;  $Q_{\text{нагрев}}$  – теплота, полученная электродвигателем;  $Q_{\text{охлаждение}}$  – теплота, отведенная от электродвигателя;  $C$  – удельная теплоемкость материала электродвигателя;  $M$  – масса электродвигателя;  $\Delta T$  – изменение температуры электродвигателя.

Таким образом, можно рассчитать нагрев электродвигателя и узнать изменение сопротивления:

$$T = T_0 + \frac{1}{CM} \int (P_{\text{heat}} - P_{\text{cool}}) dt,$$

где  $T_0$  – начальная температура;  $P_{\text{heat}}$  – мощность нагрева;  $P_{\text{cool}}$  – мощность охлаждения.

Для трехфазного электродвигателя со сбалансированными токами по всем трем фазам мощность нагрева по закону Джоуля – Ленца:

$$P_{\text{нагрев}} = 3 \left( |\vec{I}_S|^2 R_S + |\vec{I}_r|^2 R_r \right).$$

Температура внутри двигателя распределена неравномерно по толщине. В данной работе используется разбиение на две части:

- обмотка статора и ротор;
- сердечник статора и корпус.

Такое разбиение представляет электродвигатель в виде двух сосредоточенных масс с равномерной температурой во всем их объеме. Разбиение ТЭД на большее количество элементов даст более точный результат. Например, отдельно на ротор, воздушный зазор, обмотку статора и несколько колец сердечника ротора. В большинстве задач достаточно представления в виде всего одного элемента, однако рекомендуется отделять обмотку статора и ротора, поскольку их температура значительно влияет на адекватность работы системы управления из-за температурного коэффициента сопротивления.

Таким образом, используется три уравнения теплообмена:

- обмотка статора и ротор – получают теплоту из-за протекания тока;
- обмотка статора и ротор – передают теплоту сердечнику статора и корпусу;
- сердечник статора и корпус – отводят тепло во внешнюю среду.

Чтобы найти  $|\vec{I}_S|$  и  $|\vec{I}_r|$  достаточно произвести обратное преобразование Парка (рис. 15), поскольку ось двумерной системы координат

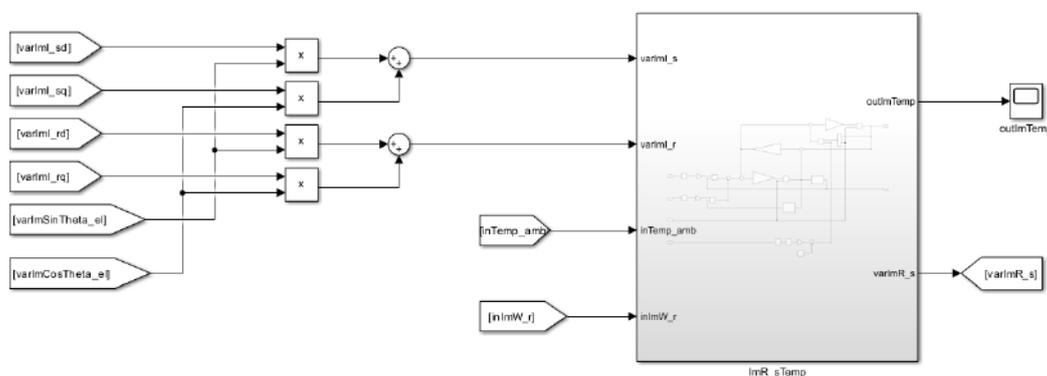


Рис. 15. Расчет фазного тока статора и ротора  
Fig. 15. Calculating phase currents of the stator and rotor

нат совпадает с осью одной из трех фаз электродвигателя.

Поскольку значения токов не имеют мнимой части, достаточно возвести их в квадрат и умножить на число фаз для расчета суммы тепловыделения каждой из них. При этом мощность, отводимая от компонента «обмотка статора и ротор», рассчитывается по закону теплообмена Ньютона, как и мощность, отводимая в окружающую среду (рис. 16).

Коэффициент конвекции между корпусом ТЭД и окружающим воздухом, как правило, зависит от скорости вращения вала двигателя из-за наличия вентилятора принудительного охлаждения. Коэффициент может быть задан по следующей формуле:

$$\alpha_{conv} = 15 + 3\sqrt{|\omega_r|},$$

где  $\alpha_{conv}$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Коэффициент теплоотдачи между обмоткой статора и ротором и сердечником статора и корпусом задан равным  $150 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$ . При этом теплоемкость обмотки статора и ротора задана равной  $400 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , а сердечника статора и корпуса –  $450 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Также следует обратить внимание на то, что на выходе блока-функции находится температура сердечника статора и корпуса.

Для расчета необходимых выходных переменных при помощи функций с рис. 5–12 требуется произвести перевод измеренных фазных напряжений из системы ABC в систему d–q (рис. 17) через известные преобразования Кларка – Парка.

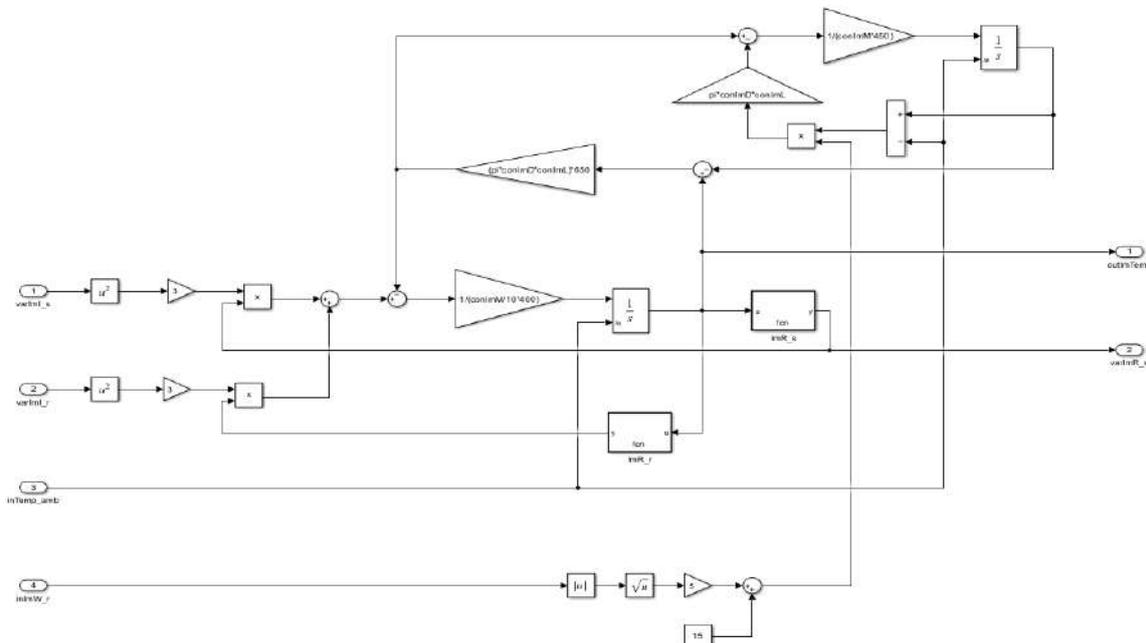


Рис. 16. Функция вычисления температуры корпуса и сопротивления обмотки статора

Fig. 16. Function of calculating the temperature of a casing and resistance of the stator’s winding

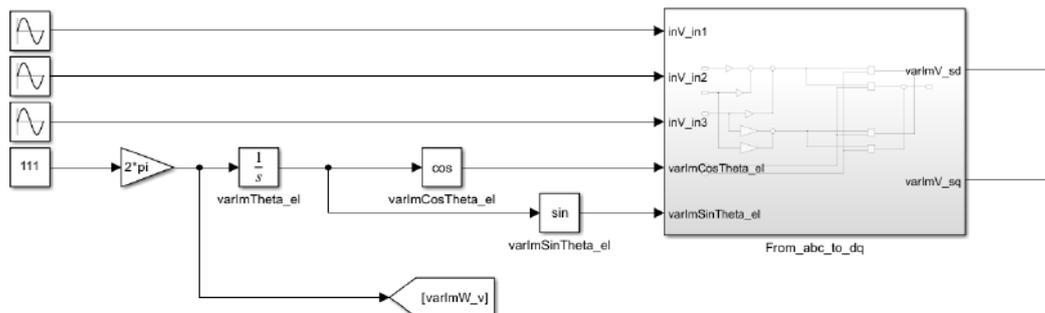


Рис. 17. Перевод фазных напряжений из системы ABC в систему d–q

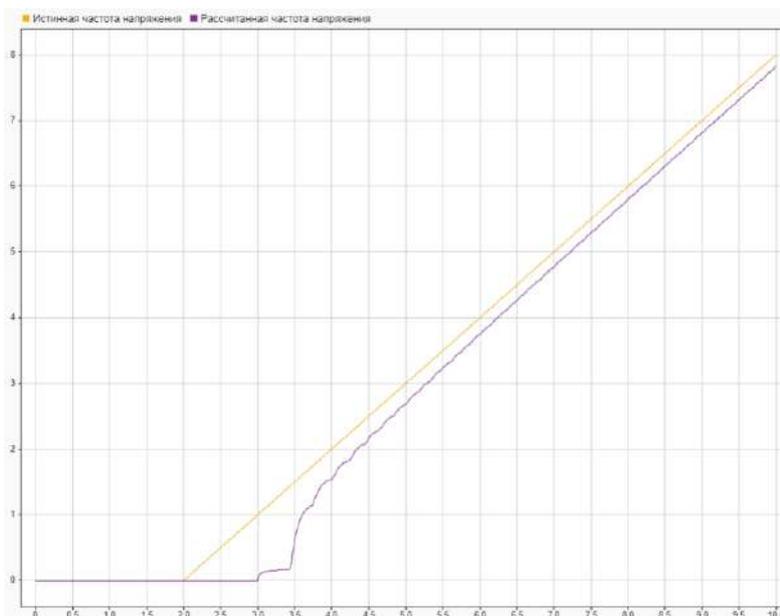
Fig. 17. Converting voltages from a–b–c to d–q

Анализ множества статей и книг [2, 5, 7, 14] показал, что на вход ММАЭД приходит заранее известный сигнал частоты питающего напряжения. Зачастую информации о ее точном значении нет, например, при питании двигателя от частотного инвертора. В этом случае требуется дополнительная функция расчета частоты по известным сигналам напряжения. В случае питания электродвигателя чистым синусоидальным сигналом, алгоритм может быть основан на интервале времени пересечения средней точки напряже-

ния (рис. 18) либо для этого требуется отфильтровать сигнал напряжения фильтром низких частот для достижения синусоидальной формы с минимальным уровнем высокочастотных шумов.

Желтая линия показывает истинное значение частоты, а фиолетовая – рассчитанное. Имеется временная задержка, уменьшающаяся с ростом частоты.

Другим методом является расчет опережения частоты вращения поля частоты вращения ротора (рис. 19).



**Рис. 18.** Расчет частоты напряжения по пересечению нуля

**Fig. 18.** Calculation of voltage frequency by zero-crossing



**Рис. 19.** Расчет частоты напряжения по опережению поля

**Fig. 19.** Calculation of voltage frequency by field lead

Каждый из методов имеет недостатки, выраженные в задержке расчета реального значения. Однако не всегда есть информация о точном значении частоты, и использование подобных методов неизбежно. В этом случае рекомендуется использовать второй, который основан на формуле:

$$\omega_{el} - \omega_r = \Delta\omega = \frac{L_m T_{sq}}{\frac{T_r L_m}{T_r s + 1} I_{sd}},$$

где  $\omega_{el}$  – скорость вращения поля статора;  $\Delta\omega$  – разница между скоростью вращения поля статора и скоростью вращения ротора;  $T_r = L_r / R_r$  – постоянная времени ротора;  $s$  – операторный вид производной.

Данное значение нужно прибавить к скорости вращения ротора (рад/сек) для нахождения частоты вращения поля.

### Результаты моделирования

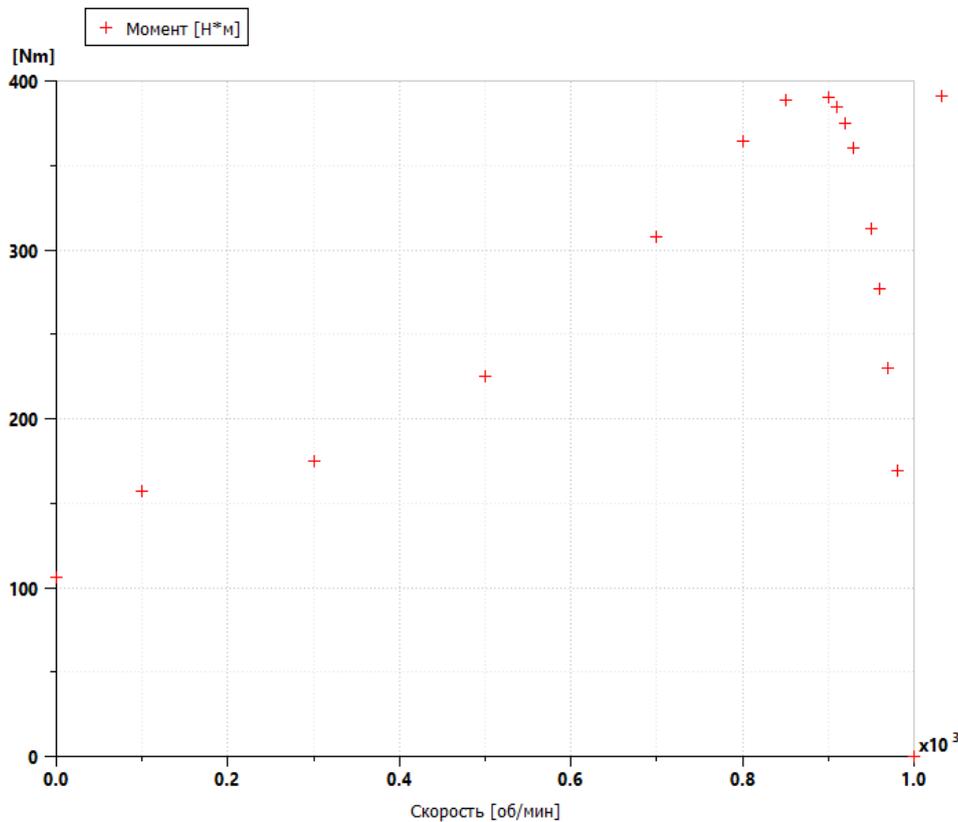
Для расчета параметров эквивалентной Т-образной схемы замещения по каталожным данным (см. табл. 2) была использована методика из [16]. Рассчитанные значения занесены в

табл. 3 и заданы в виде параметров математической модели.

**Таблица 3.** Параметры эквивалентной схемы замещения электродвигателя АИР180М6  
**Table 3.** Parameters of equivalent circuit model of an electric motor AIR180M6

Параметр Parameter	Значение Volume
$R_s$ , Ом	0,6402
$R_r$ , Ом	0,1310
$R_f$ , МОм	1,426
$L_{ls}$ , мГн	1,2
$L_{lr}$ , мГн	1,6
$L_m$ , мГн	133,2

Для проверки соответствия техническим характеристикам была построена механическая характеристика электродвигателя с этими параметрами. На рис. 20 приведена зависимость момента от скорости вращения, а на рис. 21 – зависимость мощности на валу от скорости вращения.



**Рис. 20.** Зависимость момента от скорости вращения  
**Fig. 20.** Torque dependence on angular velocity

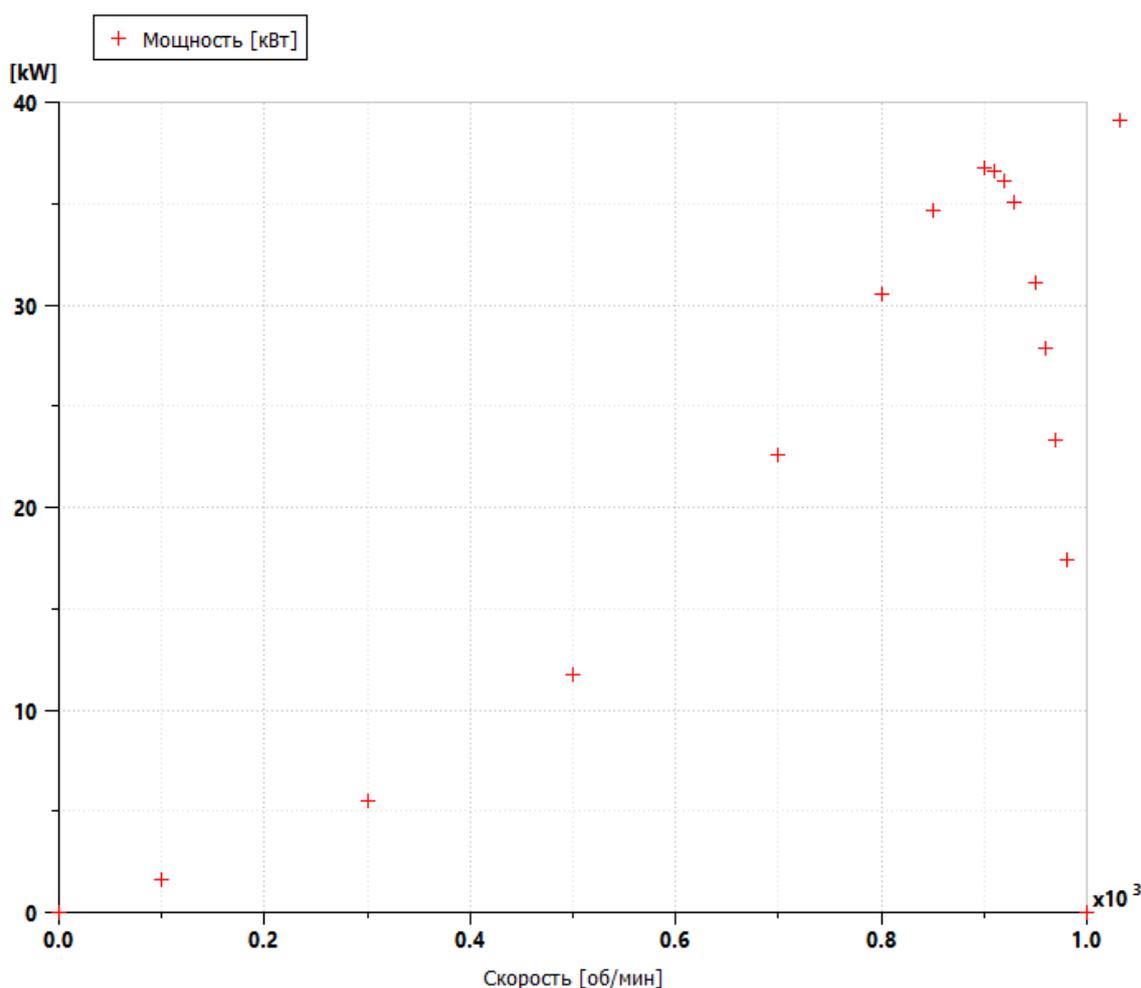


Рис. 21. Зависимость мощности от скорости вращения

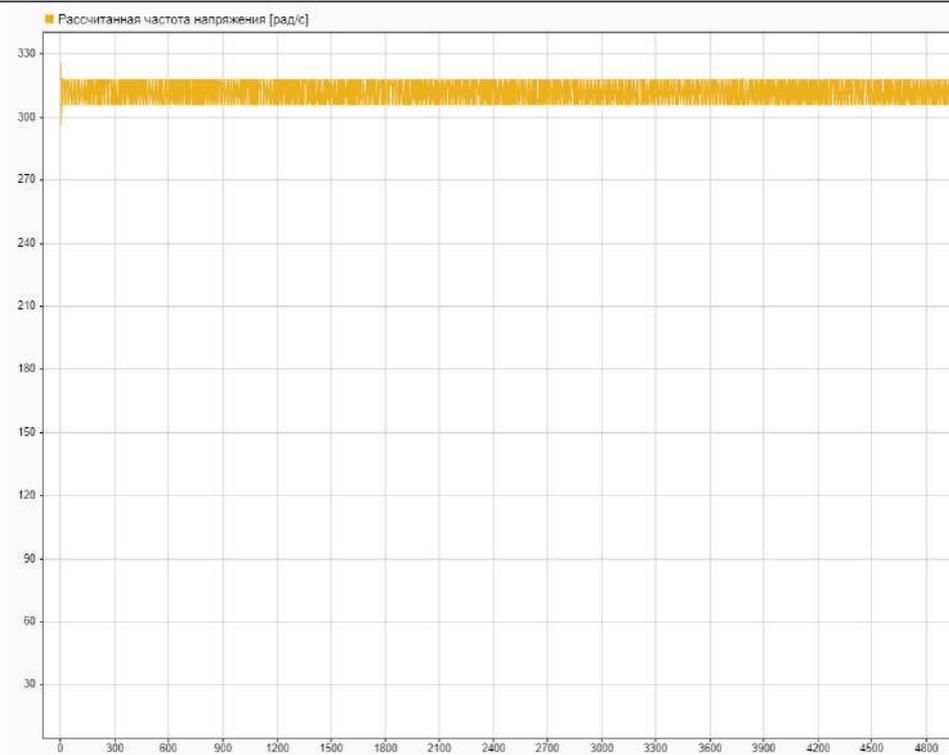
Fig. 21. Power dependence on angular velocity

Видно, что на заявленной номинальной частоте достигается момент и мощность, незначительно завышенные по сравнению с заявленными (в пределах 10 %). Погрешность может быть уменьшена дополнительными итерациями алгоритма расчета параметров или изменением коэффициента  $\beta$  и не является критической для целей этой работы.

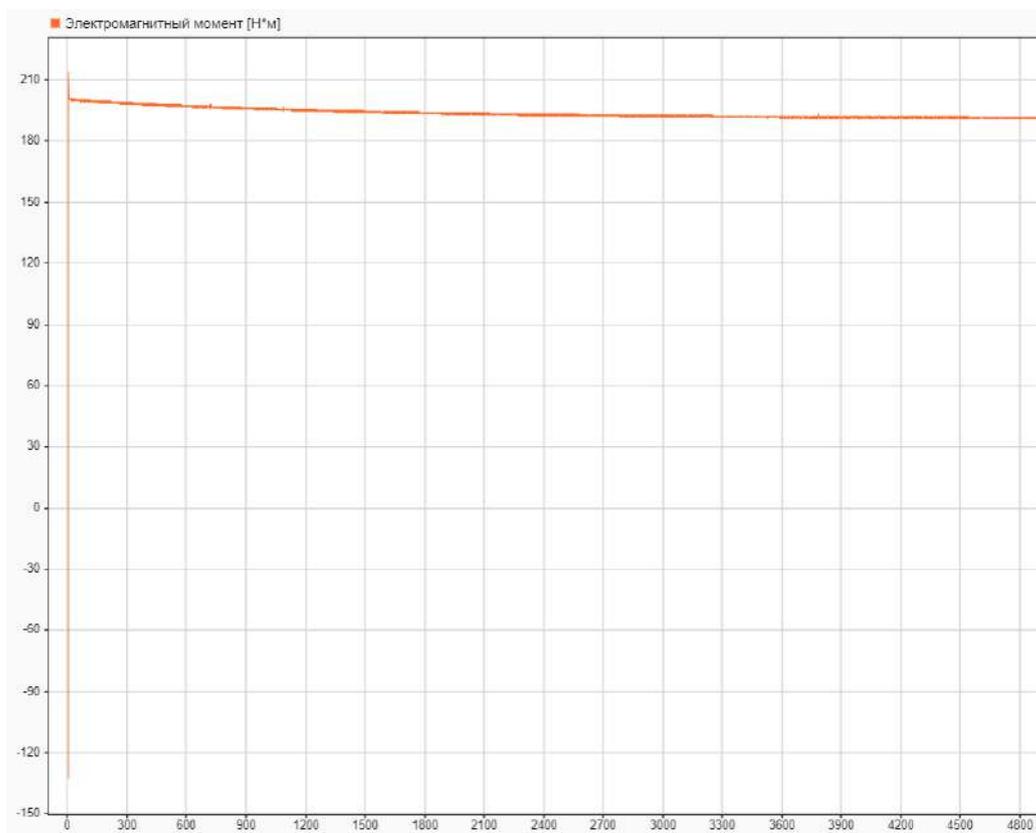
Расчет был проведен для 5 000 с виртуального времени. Входными сигналами являлись синусоидальное напряжение номинальной амплитуды и частоты (380 В, 50 Гц), номинальная скорость вращения (975 об./мин.) и нормальная температура окружающего воздуха (20 °С). Переменными для отображения были выбраны *рассчитанная частота питающего*

*напряжения* (рис. 22), *электромагнитный момент* (рис. 23), *температура обмотки и корпуса* (рис. 24) и *взаимоиндукция* (рис. 25).

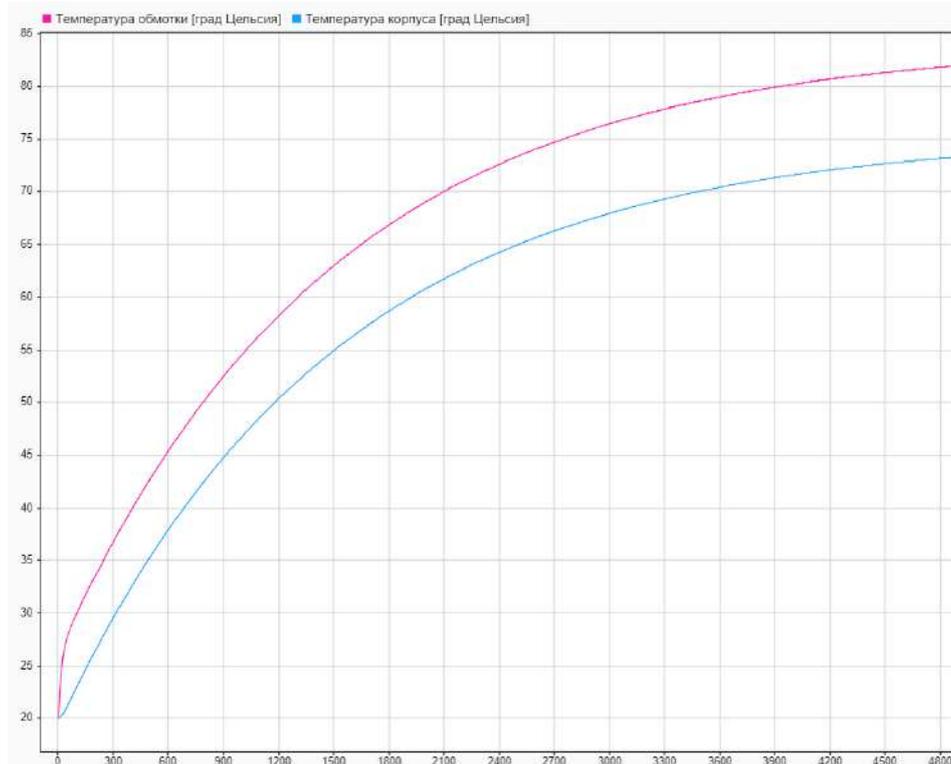
Биения сигнала рассчитанной частоты не являются критическими, поскольку влияют в большей степени на реактивную составляющую сопротивления обмотки. Увеличение температуры обмотки статора приводит к росту ее активного сопротивления. Это предсказуемо проявляется в уменьшении момента, а также в увеличении взаимоиндукции (из-за снижения тока намагничивания). Несмотря на то, что двигатель не вышел полностью в установившийся режим работы, можно утверждать, что температура обмотки не превышает 90 °С, а температура корпуса – 80 °С.



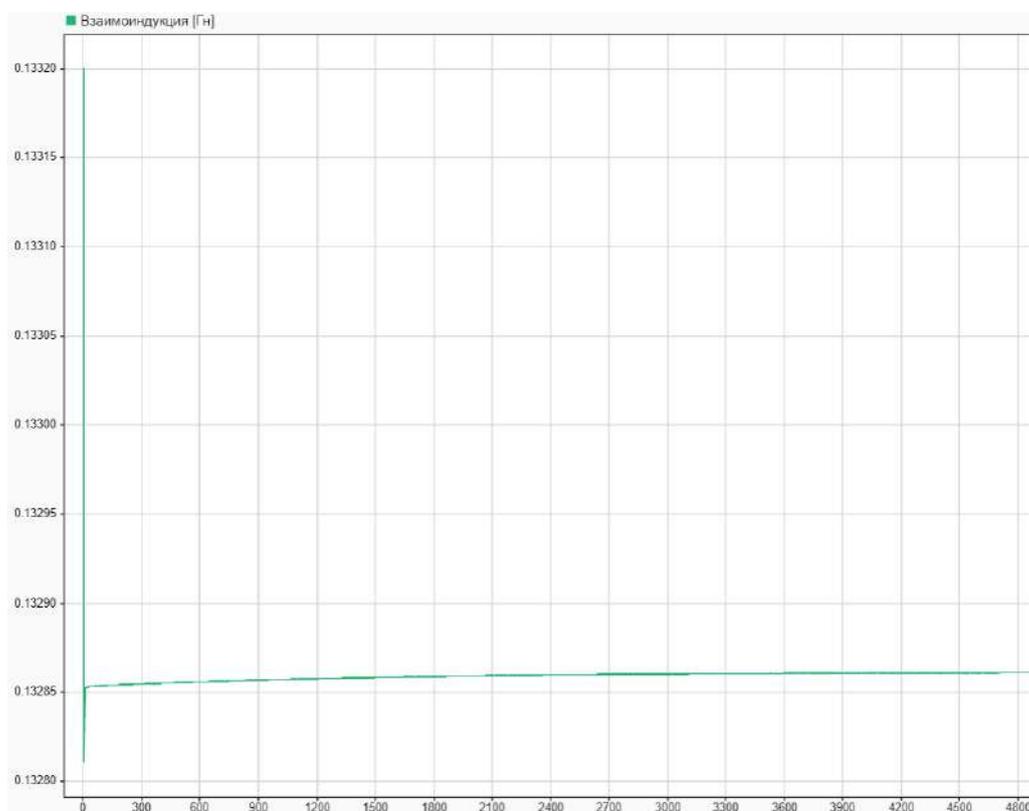
**Рис. 22.** Рассчитанная частота напряжения  
**Fig. 22.** Calculated voltage frequency



**Рис. 23.** Электромагнитный момент электродвигателя  
**Fig. 23.** Electromagnetic torque of the electric motor



**Рис. 24.** Температура электродвигателя  
**Fig. 24.** Temperature of the electric motor



**Рис. 25.** Взаимоиндукция электродвигателя  
**Fig. 25.** Inter-induction of the electric motor

**Заключение**

В данной работе была разработана ММАЭД. Особенности, отличающими ее от большинства других моделей, являются учет намагничивания и потерь в стали, а также отсутствие обязательного сигнала частоты питающего напряжения. Это позволяет применять подобную модель в комплексных моделях частотных приводов, в которых используется широко-модулированное напряжение.

Данная ММАЭД также учитывает температурное изменение сопротивления обмотки статора. Вместо представления электродвигателя в

виде однородного тела, он был разделен на две части: *обмотка статора и ротор, сердечник статора и корпус*. Это позволяет более точно определять сопротивление статорной обмотки, что критично для систем управления, основанных на бездатчиковом методе.

Адекватность модели подтверждается достижением номинального момента с погрешностью менее 5 %, характерным изменением кривой электромагнитного момента и взаимоиндукции.

**Список литературы**

1. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А.А. Андрущенко, Ю.В. Бабков, А.А. Зарифьян и др. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2014. 412 с.
2. Increasing the Performance of Electric Traction in the Long Term on the Next-Generation Technological Horizon / A.T. Burkov, A.N. Marikin, A.V. Mizintsev et al. // Russian Electrical Engineering. 2018. Vol. 89, № 10. P. 588–591.
3. Ronanki D., Singh S.A., Williamson S.S. Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2017. Vol. 3. Iss. 3. P. 724–738.
4. Blasco-Gimenez R. High Performance Sensorless Vector Control of Induction Motor Drives. Nottingham : University of Nottingham, 1995. 269 p. DOI :10.1109/TTE.2017.2703583.
5. Korkmaz F. Performance improvement of induction motor drives with model-based predictive torque control // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2020. Vol. 28. No 1. P. 525–539.
6. Bose B.K. Modern power electronics & AC drives. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 738 p.
7. Фролов Ю.М. Электрический привод. СПб. : Лань, 2021. 236 с.
8. Солодкий Е.М., Сальников С.В., Даденков Д.А. Диагностика межвиткового замыкания обмотки статора асинхронного двигателя на основе анализа траектории вращения вектора тока статора // Вестн. ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 34. С. 114–127.
9. Вейнреб К. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора // Электричество. 2012. № 7. С. 51–57.
10. Рогачев В.А. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2008. 19 с.
11. Киселев И.Г., Курилкин Д.Н., Шрайбер М.А. Тепловая модель асинхронного тягового электродвигателя тепловоза // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2021. Т. 18. № 4. С. 460–468.
12. Дорошенко И.В., Погуляев М.Н. Имитационная модель асинхронной машины с фазным ротором в MATLAB Simulink // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. 2021. № 2 (85). С. 99–106.
13. Макаров В.Г. Асинхронный электропривод с оптимальными режимами работы. Казань : Казан. гос. технолог. ун-т, 2010. 299 с.
14. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высш. шк., 2001. 327 с.
15. Ratnani Punit L., Thosar A.G. Mathematical Modelling of an 3 Phase Induction Motor Using MATLAB/Simulink // International journal of scientific research in science, engineering and technology. 2014. Vol. 4. Iss. 6. P. 137–141.
16. Шенделёв М.А. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод испытательного стенда : магистер. дис. Томск, 2018. 138 с.
17. Усольцев А.А., Лукичев Д.В. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным // Изв. высш. учеб. завед. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 10. С. 35–41.
18. Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные. М. : Солон-Р, 2002. 304 с.
19. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М. : ЭФО, 2013. 72 с.

**References**

1. Andryushchenko A.A., Babkov Yu.V., Zarif'yan A.A., Kashnikov G.F., Kolpakhch'yan P.G., Perfil'ev K.S., Yanov V.P. Asinkhronnyi tyagovyi privod lokomotivov [Asynchronous traction drive of locomotives]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2014. 412 p.
2. Burkov A.T., Marikin A.N., Mizintsev A.V., Seronov V.V. Increasing the Performance of Electric Traction in the Long Term on the Next-Generation Technological Horizon. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, no. 1, pp. 588–591.
3. Ronanki D., Singh S.A., Williamson S.S. Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, vol. 3, iss. 3, pp. 724–738.
4. Blasco-Gimenez R. High Performance Sensorless Vector Control of Induction Motor Drives. Nottingham : University of Nottingham, 1995. 269 p.

5. Korkmaz F. Performance improvement of induction motor drives with model-based predictive torque control. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2020, vol. 28, no 1, pp. 525–539.
6. Bose B.K. Modern power electronics & AC drives. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 738 p.
7. Frolov Yu.M. Elektricheskii privod [Electric drive]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2021. 236 p.
8. Solodkii E.M., Sal'nikov S.V., Dadenkov D.A. Diagnostika mezhvitkovogo zamykaniya obmotki statora asinkhronnogo dvigatelya na osnove analiza traektorii vrashcheniya vektora toka statora [Diagnostics of inter-turn closure of the stator winding of an asynchronous motor based on the analysis of the rotation trajectory of the stator current vector]. *Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of Perm' National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems], 2020, no. 34, pp. 114–127.
9. Veinreb K. Diagnostika neispravnosti rotora asinkhronnogo dvigatelya metodom spektral'nogo analiza tokov statora [Diagnostics of malfunctions of the rotor of an asynchronous motor by the method of spectral analysis of stator currents]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2012, no. 7, pp. 51–57.
10. Rogachev V.A. Diagnostirovanie ekscentrisiteta rotora asinkhronnykh elektrodvigatelei po garmonicheskomu sostavu toka statora [Diagnosing the eccentricity of the rotor of asynchronous electric motors by the harmonic composition of the stator current]. Ph.D's thesis. Novocheboksarsk, 2008. 19 p.
11. Kiselev I.G., Kurilkin D.N., Shraiber M.A. Teplovaya model' asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigateleya teplovoza [Thermal model of asynchronous traction electric motor of a diesel locomotive]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Petersburg Transport University], 2021, vol. 18, no. 4, pp. 460–468.
12. Doroshchenko I.V., Pogulyaev M.N. Imitatsionnaya model' asinkhronnoi mashiny s faznym rotorom v MATLAB Simulink [Simulation model of asynchronous machine with phase rotor in MATLAB Simulink]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi], 2021, no. 2(85), pp. 99–106.
13. Makarov V.G. Asinkhronnyi elektroprivod s optimal'nymi rezhimami raboty [Asynchronous electric drive with optimal operating modes]. Kazan': KGTU Publ., 2010. 299 p.
14. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001. 327 p.
15. Ratnani Punit L., Thosar A.G. Mathematical Modelling of an 3 Phase Induction Motor Using MATLAB/Simulink. *International journal of scientific research in science, engineering and technology*, 2014, vol. 4, iss. 6, pp 137–141.
16. Shendelev M.A. Asinkhronnyi chastotno-reguliruemiy elektroprivod ispytatel'nogo stenda [Asynchronous frequency-controlled electric drive of the test bench]. Master's thesis. Tomsk, 2018. 138 p.
17. Usol'tsev A.A., Lukichev D.V. Opredelenie parametrov modeli asinkhronnogo dvigatelya po spravochnym dannym [Determination of parameters of the asynchronous motor model according to reference data]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priboroostroeniye* [Bulletins of higher educational organizations. Instrumentation], 2008, vol. 51, no. 10, pp. 35–41.
18. Likhachev V.L. Elektrodvigateley asinkhronnye [Asynchronous electric motors]. Moscow: SOLON-R Publ., 2002. 304 p.
19. Kalachev Yu.N. Vektornoe regulirovanie (zametki praktika) [Vector regulation (notes of practice)]. Moscow: EFO Publ., 2013. 72 p.

### Информация об авторах

**Бирюков Антон Эдуардович**, инженер отдела математического моделирования и теоретических исследований, ООО «Синара Алгоритм», г. Москва; e-mail: BirukovAE@sinara-group.com.

**Сорокин Дмитрий Геннадьевич**, руководитель отдела математического моделирования и теоретических исследований, ООО «Синара Алгоритм», г. Москва; e-mail: SorokinDG@sinara-group.com.

### Information about the authors

**Anton E. Biryukov**, Engineer of the Department of Mathematical Modelling and Research, LTD «Sinara Algorithm», Moscow; e-mail: BirukovAE@sinara-group.com.

**Dmitrii G. Sorokin**, Head of the Department of Mathematical Modelling and Research, LTD «Sinara Algorithm», Moscow; e-mail: SorokinDG@sinara-group.com.

## Транспортно-логистические услуги и сервисы ОАО «РЖД», их восприятие на транспортном рынке и основные направления развития

В.А. Оленцевич✉, Н.В. Власова

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉olencevich\_va@mail.ru

### Резюме

Одной из ключевых задач Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом ОАО «РЖД» является постепенное наращивание доли транспортно-логистических услуг и сервисов, оказываемых дополнительно к базовым, в числе которых: выполнение погрузочно-разгрузочных работ, хранение грузов, промывка вагонов и контейнеров, в также переход к комплексному уровню транспортно-экспедиционного обслуживания клиентов, при котором все обязанности грузоотправителя и грузополучателя, установленные нормативными документами в области железнодорожного транспорта, принимают на себя в соответствии с доверенностью работники железнодорожного транспорта. Это позволит не только расширить спектр сервисного обслуживания, но и в значительной степени повысит его качество, что особо важно в условиях ужесточения конкуренции со стороны крупных российских и международных транспортно-логистических компаний. В научной статье представлены некоторые результаты социологического исследования удовлетворенности клиентов транспортно-экспедиционными услугами ОАО «РЖД», выявлены сильные и слабые стороны компании, что помогло разработать ряд мероприятий по оптимизации деятельности. Опрос показал, насколько поразному производится оценка качества работы грузовых пунктов в зависимости от рода перерабатываемого груза и в каких направлениях необходимо оптимизировать деятельность и технологические процессы. Проведенный анализ позволил установить следующее: среди всех транспортных услуг, которые клиент наиболее часто заказывает у других транспортных компаний, выделяются услуги по оформлению документов на перевозку грузов по доверенности и экспедирование. В связи с этим предложено техническое решение, направленное на повышение качества работы отрасли в данном направлении.

### Ключевые слова

маркетинговая стратегия ОАО «РЖД», транспортно-экспедиционные услуги, сопроводительные сервисы, устойчивое конкурентное преимущество, экспедирование грузовой отправки, показатель удовлетворенности работой

### Для цитирования

Оленцевич В.А. Транспортно-логистические услуги и сервисы ОАО «РЖД», их восприятие на транспортном рынке и основные направления развития / В.А. Оленцевич, Н.В. Власова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 77–86. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).77-86.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 05.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 12.09.2023 г.; принята к публикации: 13.09.2023 г.

## Transport and logistics services and services of JSC «Russian Railways», their perception in the transport market and the main directions of development

V.A. Olentsevich✉, N.V. Vlasova

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉olencevich\_va@mail.ru

### Abstract

One of the key tasks of the Central Directorate for the Management of the Terminal and Warehouse Complex of JSC «Russian Railways» is the gradual increase in the share of transport and logistics services and services provided in addition to the basic, traditionally rendered services and services, which include: loading and unloading operations, cargo storage, washing of wagons and containers, as well as the transition to a comprehensive level of freight forwarding customer service, in which all the responsibilities of the shipper and the consignee, established by regulatory documents in the field of railway transport, are taken over by railway transport workers in accordance with the power of attorney. This trend makes it possible not only to expand the range of service, but also to significantly improve its quality, which is especially important in the conditions of increasing competition from large Russian and international transport and logistics companies. The scientific article presents some results of a sociological study of customer satisfaction with freight forwarding services of JSC «Russian Railways», identifies the strengths and weaknesses of the company, which made it possible to develop and present a number of measures to optimize activities. The survey

results showed how differently the assessment of the quality of work of cargo points is carried out depending on the type of cargo being processed and in which directions the activities and technological processes are to be optimized. The analysis showed the following: the main transport service that the client prefers to order from other transport companies is services for the registration of documents for the carriage of goods by proxy and forwarding. A technical solution aimed at improving the quality of the industry's work in this direction is proposed.

### Keywords

marketing strategy of JSC «Russian Railways», freight forwarding services, accompanying services, sustainable competitive advantage, freight forwarding, job satisfaction indicator

### For citation

Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Transportno-logisticheskie uslugi i servisy OAO «RZhD», ikh vospriyatie na transportnom rynke i osnovnye napravleniya razvitiya [Transport and logistics services and services of JSC «Russian Railways», their perception in the transport market and the main directions of development]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 77–86. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).77-86.

### Article Info

Received: September 5, 2023; Revised: September 12, 2023; Accepted: September 13, 2023.

### Введение

С уходом недружественных стран из экономики Российской Федерации, для наших азиатских и африканских партнеров открылись возможности по расширению рынков сбыта продукции на территории России, что позволяет реализовывать совместные крупные торгово-промышленные проекты. Большинство таких проектов планируется на 2025–2033 гг. Совместная экономическая деятельность с новыми государствами-партнерами предполагает транспортировку товаров из России. По направлению Россия – Африка в 2023 г. перевезено свыше 7 млн т различных грузов, из этого объема 3,6 млн т пришлось на зерновые грузы. Заметное место в перевозках занимает руда, химикаты, нефтяные продукты.

Значительно изменился объем и структура грузопотоков международных транспортных коридоров, поскольку России в кратчайшие сроки необходимо обеспечить безопасный экспорт своей продукции в азиатские и африканские страны и, соответственно, получать импортные товары из дружественных стран. Инфраструктурные проекты, которые в настоящее время реализуются на территориях Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, являются ярким тому подтверждением. Государство и транспортная отрасль уделяют колоссальное внимание развитию транспортных коридоров, это видно на примере организации работы Восточного полигона железных дорог. Учитывая географическое положение действующих и будущих производств, основной объем грузовой базы будет ориентирован на рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона.

Нарастающая тенденция к включению железных дорог в глобальные логистические цепочки, которая сопровождается формированием новых мультимодальных маршрутов, ростом интереса крупнейших российских и азиатских производителей продукции к транспортно-логистическим услугам и сервисам ОАО «РЖД», их восприятие на транспортном рынке и основные направления развития, приводят к необходимости повышения качества имеющихся транспортных продуктов и услуг и создания новых.

Долгосрочный, перспективный подход к планированию деятельности ОАО «РЖД» представлен основным регламентирующим документом – Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 г., в рамках которого как отдельное актуальное направление, способствующее достижению устойчивого конкурентного преимущества отрасли на рынке транспортных услуг и сервисов, выделена «Маркетинговая стратегия развития ОАО «РЖД» [1].

Исходя из общей маркетинговой стратегии развития отрасли, разработка маркетинговой стратегии транспортно-логистических услуг и сервисов структурных подразделений и филиалов Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом (ЦМ), должна основываться на следующих этапах:

– факторный анализ текущего состояния деятельности транспортной компании или структурного подразделения, ее внутренней информации и отчетности;

– маркетинговые исследования российского и международного транспортных рынков,

выявление роли и позиций ОАО «РЖД» в секторе транспортно-логистических услуг;

– изучение сфер влияния конкурентных транспортных компаний, прогноз их влияния на деятельность ОАО «РЖД»;

– проведение маркетинговых исследований с целью определения ценностей услуг структурных подразделений и филиалов ЦМ для клиентов, составление портрета целевого пользователя;

– выбор стратегии развития по сегментам транспортного рынка и с учетом сегментации клиентов;

– определение портфеля проектов и мероприятий, реализация которых необходима для достижения целей маркетинговой стратегии (данную работу необходимо проводить и на этапе разработки стратегии, и в ходе ее реализации для своевременной корректировки планов и успешного достижения конечного результата);

– текущее сопровождение и исследование всех этапов выполнения маркетинговой стратегии с учетом аудита и внесения необходимых корректировок, технико-экономическое обоснование предполагаемых промежуточных и конечных результатов [1–3].

### **Транспортно-логистические услуги и сервисы ОАО «РЖД», их восприятие на транспортном рынке и основные направления развития**

С начала 2023 г. Центр продажи услуг ОАО «РЖД» в Иркутске (далее – Центр) привлек более 70 новых клиентов в сфере грузовых перевозок. При этом сотрудники обработали более 800 обращений, большинство из которых связаны с организацией перевозок, обеспечением комплексного транспортно-логистического обслуживания, погрузкой и выгрузкой на терминально-складской инфраструктуре Восточно-Сибирской магистрали в регионе, а также транспортировкой мелких партий грузов.

За 2022 г. Центр заключил договоры на перевозку с сопровождением более чем со 100 компаниями. Многофункциональный офис работает по принципу «одного окна», который позволяет организовать клиенту всю логистику своего предприятия «от двери до двери». Индивидуальные комплексные решения включают транспортно-экспедиционные услуги, реализуемые в том числе с использованием автомо-

бильного транспорта, предоставление специализированных бригад для выполнения погрузочно-разгрузочных операций, оказание терминально-складских услуг и сопроводительных сервисов.

Также Центр активно подключает партнеров компании к онлайн-площадке для бизнеса «РЖД Маркет», которая предназначена для поиска, реализации и закупки товаров с выбором оптимального транспортно-логистического решения. Практически все клиенты используют возможности бесконтактного взаимодействия с компанией-перевозчиком через онлайн-сервис на официальном сайте ОАО «РЖД» в личном кабинете.

Анализ основных показателей транспортного рынка позволяет своевременно корректировать стратегии и планы развития транспортно-логистического сектора ОАО «РЖД» по достижению плановых результатов и формированию эффективных целей и задач.

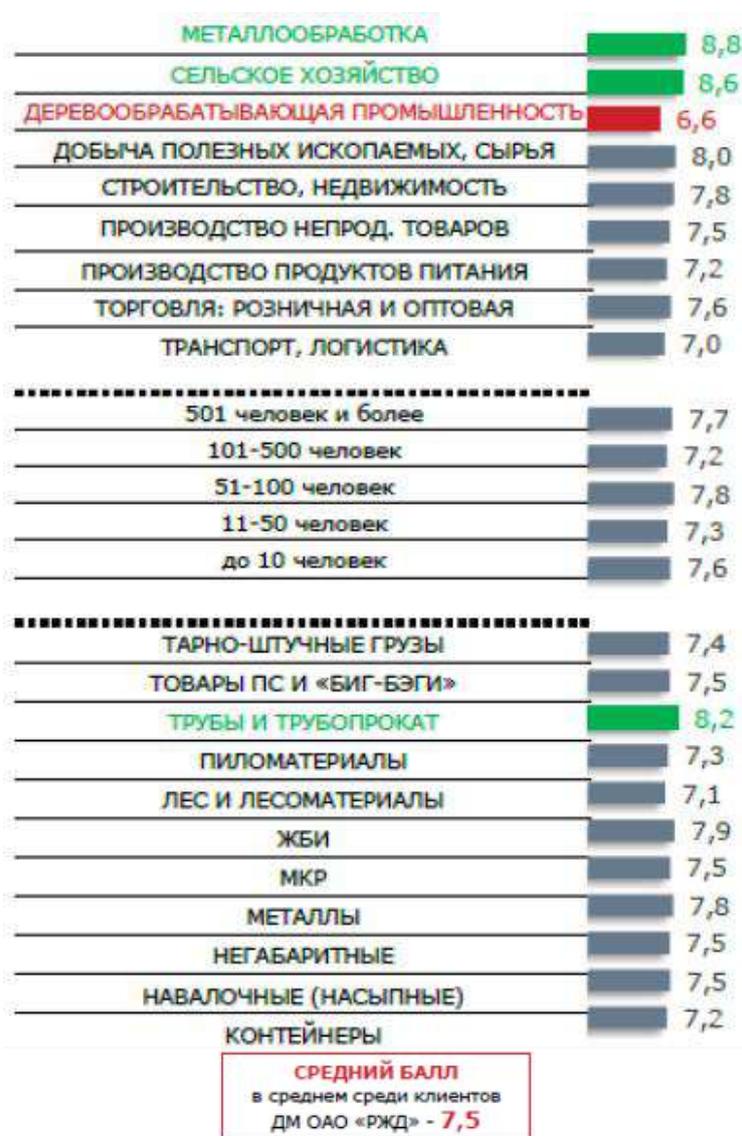
Маркетинговая стратегия ЦМ представляет собой долгосрочный, перспективный подход к планированию деятельности с фундаментальной целью достижения устойчивого конкурентного преимущества на транспортном рынке, позволяющий определить позицию, четко ориентированную на современные особенности рынка транспортной продукции, которая будет способствовать достижению максимального финансового результата.

В этой связи авторами проанализированы доли структурных подразделений и филиалов ЦМ на рынке терминально-складских услуг и сопроводительных сервисов РФ [4–9]. Проведена оценка удовлетворенности услугами в зависимости от деятельности и видов грузов. Выявлено, что показатель общей удовлетворенности услугами ЦМ несколько выше среди предприятий, занимающихся оказанием транспортных услуг и сопроводительных сервисов по переработке металлов и продукции сельского хозяйства. При этом представители предприятий металлообработки выразили недовольство стоимостью транспортно-экспедиционных услуг, но поставили высокие баллы за работу персонала, оснащенность и состояние погрузочно-выгрузочных площадок, оснащенность терминально-складских комплексов. Руководители сельхозпредприятий отметили оперативность оказания услуг и профессионализм сотрудников структурных подразделений и филиалов ЦМ.

Относительно низкий показатель удовлетворенности работой ЦМ у клиентов, занятых деревообработкой, в частности было указано на низкий уровень профессионализма работников ЦМ при организации и реализации транспортно-экспедиционных услуг. Более 30 % респондентов выразили недовольство состоянием складского комплекса, погрузочно-выгрузочными площадками, их технической оснащенностью и состоянием техники [4, 5]. Наивысшая оценка удовлетворенности у компаний, занимающихся металлообработкой с номенклатурой груза «Трубы и трубопрокат»: данный результат высказали от 51 до 100 ре-

спондентов. Низшая оценка – у занимающихся деревообработкой с номенклатурой груза «Лес и пиломатериалы»: данный результат высказали от 101 до 500 респондентов.

Результат опроса показывает, насколько по-разному происходит оценка деятельности различных грузовых дворов ЦМ в зависимости от рода перерабатываемого груза, а, соответственно, и направлений деятельности, которые необходимо улучшить. Средняя оценка уровня оказания транспортно-экспедиционных услуг среди клиентов ОАО «РЖД» составила 7,5 балла. На рис. 1 представлены результаты сравнительной оценки удовлетворенности клиентов



**Рис. 1.** Сравнительная оценка удовлетворенности клиентов услугами ОАО «РЖД» по номенклатуре груза и сопроводительным сервисам

**Fig. 1.** Comparative assessment of customer satisfaction with the services of JSC Russian Railways by cargo nomenclature and escorting services

услугами и сопутствующими сервисами ОАО «РЖД» по итогам работы 2022 г. [6–8].

Общая удовлетворенность клиентов ЦМ, оценивших услугу (сервис), от 1 до 10 баллов. Среднее значение, согласно результату сравнительной оценки удовлетворенности клиентов услугами и сопроводительными сервисами ОАО «РЖД» по номенклатуре груза, – 7,5 баллов, что говорит об эффективной работе структурных подразделений ЦМ.

Можно выделить основные транспортно-экспедиционные услуги и сопроводительные сервисы, которые в настоящее время достаточно хорошо известны клиентам ЦМ: погрузочно-разгрузочные работы, хранение, взвешивание, очистка и промывка подвижного состава. Однако существуют прочие услуги и сервисы, которые клиент предпочитает заказывать у других компаний:

- оформление документов на перевозку грузов по доверенности, экспедирование;
- доставка автотранспортом (перевозки между железной дорогой и грузовладельцами);
- розыск груза по пути движения желез-

нодорожного транспорта (данная услуга ЦМ не предоставляется, однако она актуальна среди действующих и потенциальных клиентов ЦМ).

Услуги ЦМ и уровень их восприятия на транспортном рынке с учетом направлений развития представлены на рис. 2.

На недостаточность информационной составляющей в секторе услуг ОАО «РЖД» участники опроса указали также в своих комментариях.

Анализ результатов анкетирования клиентов, пользующихся услугами и сопроводительными сервисами ОАО «РЖД», показал, что клиенты предпочитают заказывать у других транспортных компаний такие услуги, как оформление документов на перевозку грузов по доверенности и экспедирование. Далее рассмотрим подробно основные способы повышения качества работы ЦМ в данном направлении [9].

В категории «востребованность отдельными видами услуг» можно выделить погрузочно-разгрузочные работы, 44 % опрошенных клиентов пользуются данными услугам в ЦМ, отмечая такие преимущества, как хорошая тех-



Рис. 2. Востребованность основных видов услуг и сопроводительных сервисов

Fig. 2. Demand for basic type and escorting services

ническая оснащенность производственной базы и наиболее приемлемая для клиента стоимость услуги. При этом так же отмечен факт безальтернативности в работе с ЦМ.

Стоит сказать, что техническая оснащенность ЦМ оценивается по-разному. С одной стороны, этот показатель является основным преимуществом, которое отмечают клиенты, с другой – главной претензией (среди тех, кто не относится к числу клиентов ОАО «РЖД» – низкий уровень оснащения и плохое состояние материально-технической базы отдаленных механизированных участков, невысокое качество сервиса и работы сотрудников структурных подразделений). Вероятно, ключевое значение имеет состояние базы каждого конкретного структурного подразделения.

Явные выделенные минусы – низкий уровень оперативности работы и недостаточная клиентоориентированность.

При оценке услуги «Автомобильная доставка груза», пользователи указали, что ключевое преимущество ЦМ в данном случае – предоставление услуг «одним пакетом». Это позволяет партнерам не тратить время на поиск других вариантов, составление логистических схем и координацию. В качестве плюса они также отметили возможность работы по единому договору в разных регионах, независимо от местных условий функционирования. При этом были указаны следующие минусы:

– жесткая ценовая политика ОАО «РЖД» при формировании тарифа на услуги и сопроводительные сервисы;

– негибкая тарификация;

– низкий уровень оперативности при согласовании условий (в том числе режим работы сотрудников);

– негибкий график предоставления автотранспортных средств.

Таким образом, с целью укрепления позиций ЦМ на рынке транспортных услуг, увеличения рыночной доли, необходимо развитие следующих приоритетных направлений:

– наращивание доли в местах общего пользования в рамках существующей номенклатуры грузов в пределах и за пределами грузовых дворов, в том числе за счет «Мобильных бригад» и «Сервисов быстрого реагирования»;

– развитие услуг в местах общего пользования посредством расширения номенклатуры грузов;

– развитие комплексных услуг на местах необщего пользования;

– оказание полного комплекса экспедиторских услуг (ЦМ-экспедитор), в том числе при отправлении грузов на экспорт (ЦМ-брокер).

Для дирекции по управлению терминально-складским комплексом Восточного полигона в качестве мероприятий по реализации приоритетных направлений ЦМ можно предложить:

– развитие проекта «ЦМ-экспедитор» по ст. Базаиха, Красноярск, Хабаровск II, Комсомольск;

– формирование и отправка контейнерных поездов со ст. Красноярск, Абакан, Канск-Енисейский;

– организация работы с зерновыми грузами по ст. Ужур, Канск-Енисейский, Минусинск, Красноярск;

– погрузка угля по ст. Нижнеудинск;

– формирование ускоренных контейнерных поездов со ст. Братск;

– оказание комплекса услуг с контейнерными грузами по ст. Благовещенск;

– погрузка угля в вагоны и контейнеры типа open top на ст. Петровский завод, Приаргунск, Могойтуй, Борзя, Краснокаменск;

– внедрение технологии по переработке тяжеловесных грузов (минеральные удобрения) на полигонах Читинской, Белогорской и Забайкальской механизированных дистанций;

– реализация транспортно-экспедиционной услуги по отправлению контейнеров с продукцией в контейнерных поездах со ст. Биробиджан;

– завоз и отправка грузов в составе контейнерных поездов со ст. Комсомольск;

– развитие междугородних перевозок грузов с использованием нового автотранспорта;

– оказание транспортно-экспедиционных услуг в рамках строительства ГОКа Малмыжского месторождения.

### **Экспедирование грузовой отправки**

Услуга экспедирования грузовой отправки воспринимается исследуемой целевой аудиторией не совсем однозначно. Общее экспедирование на железнодорожном транспорте подразумевает оформление документации, расчеты с железной дорогой, аренду подвижного состава, раскредитование вагонов и т.п. С одной стороны, особенно в случае со сложными грузами и маршрутами, услуги по общему экспедирова-

нию могут быть выделены в отдельное направление, более того, ряд опрошенных клиентов ОАО «РЖД» являются логистическими компаниями, специализирующимися как раз на оказании услуги по экспедированию грузов. С другой стороны, данная услуга воспринимается клиентами в значительной степени как само собой разумеющееся, входящее в обязанности перевозчика [10–13].

В ряде случаев при проведении опроса интервьюерам пришлось столкнуться с ситуацией непонимания предмета разговора со стороны клиентов при обсуждении вопроса о востребованности услуг экспедирования. Некоторые компании, особенно небольшие, самостоятельно занимаются работами, связанными с экспедированием, не воспринимая их при этом как какую-то специфическую «пакетную» услугу или сервис.

Опыт использования и оценки преимуществ услуги по оформлению документов на перевозку грузов по доверенности и экспедированию представлен на рис. 3.

Основным преимуществом ЦМ ОАО «РЖД» по данному виду реализуемых услуг является предоставление услуги в «одном пакете» с другими услугами, что имеет большое значение для клиентов ЦМ. Как положитель-

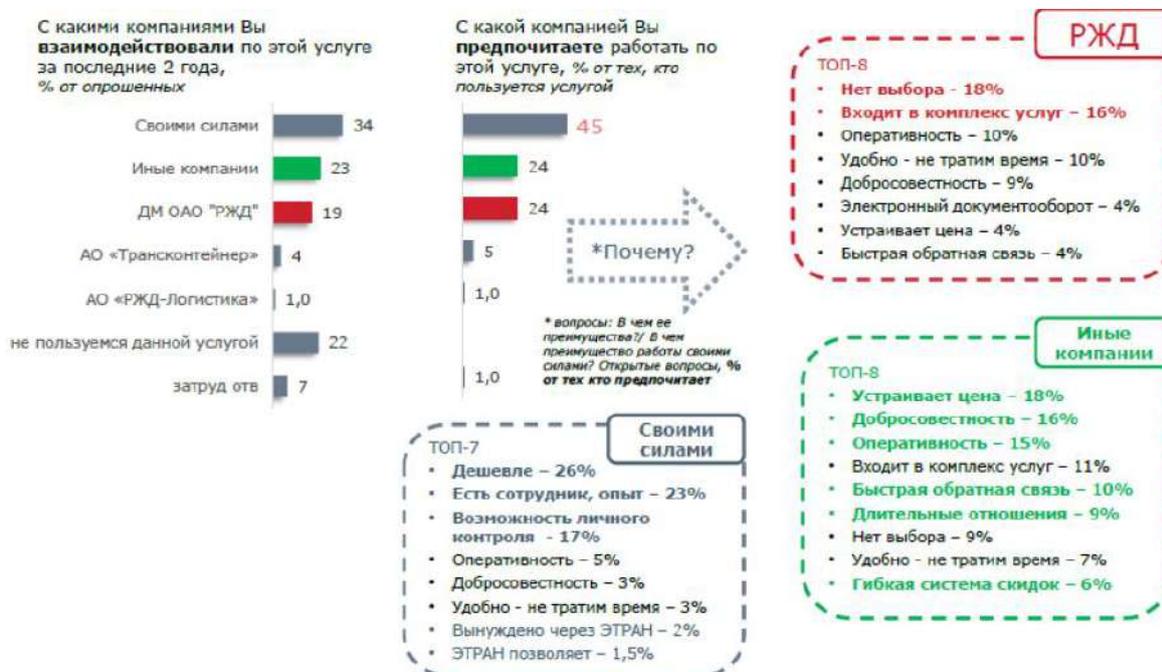
ный фактор отмечалась возможность применения электронного документооборота, при этом в числе отрицательных факторов, помимо стоимости предоставления услуг, назывались оперативность обратной связи, режим ее получения и качество сервиса оказания услуг. Часть респондентов не имеет представления о данной услуге [14].

С точки зрения оценки востребованности услуги 18 % опрошенных отмечают, что пользуются ей, так как не видят другого выбора, а также потому, что данная услуга входит в комплекс услуг. У конкурентов ОАО «РЖД» пользователей устраивает стоимость услуги, качество и сроки ее выполнения, оперативность документооборота, быстрая обратная связь, длительные отношения и устойчивая гибкая система скидок [15, 16].

С целью повышения качества оформления документов на перевозку грузов по доверенности и экспедирования грузов предлагается введение услуги «ЦМ-экспедитор», которая позволит:

– увеличить долю дополнительных услуг, оказываемых клиентам;

– проводить ежегодное утверждение и реализацию пути развития проекта «ЦМ-экспедитор»;



**Рис. 3.** Опыт использования услуги по оформлению документов на перевозку грузов по доверенности и экспедированию и оценка ее преимуществ  
**Fig. 3.** Experience in using document preparation services for the cargo transportation by proxy and forwarding with assessment of its advantages

– осуществить переход к электронному оформлению документов на основании доверенности.

При этом проведенный опрос показал высокую степень востребованности данной услуги при ее наличии в системе ОАО «РЖД» [17–20].

### Заключение

Проведенное социологическое исследование по определению критериев удовлетворенности клиентов транспортно-экспедиционными услугами и сопроводительными сервисами ОАО «РЖД» позволило выявить основные проблемные направления в развитии ряда услуг и сопроводительных сервисов, оказываемых ЦМ ОАО «РЖД».

По результатам проведенного опроса, выделены основные услуги и сопроводитель-

ные сервисы, которые клиент предпочитает заказывать у прочих транспортных компаний. К категории данных услуг респондентами были отнесены:

- оформление документов на перевозку грузов по доверенности, экспедирование;
- доставка автотранспортом (перевозки между железной дорогой и грузовладельцами);
- розыск груза по пути движения железнодорожного транспорта (данная услуга ЦМ не предоставляется, однако она актуальна среди действующих и потенциальных клиентов ЦМ).

С целью улучшения качества оформления документов на перевозку грузов по доверенности и экспедирование предлагается введение услуги «ЦМ-экспедитор», позволяющая значительно повысить уровень клиентоориентированности в отрасли.

### Список литературы

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года // Волгоградский Терком РОСПРОФЖЕЛ : сайт. URL : <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Дата обращения 01.09.2023).
2. Об утверждении концепции клиентоориентированности холдинга «РЖД» в области грузовых перевозок : распоряжение ОАО «РЖД» от 07.12.2016 г. № 2487р. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
3. Грузы готовы ехать. ОАО «РЖД» прогнозирует рекордные экспортные перевозки в 2022 году // Gudok.ru : сайт. URL: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1593862/> (Дата обращения 29.08.2023).
4. Иванкова Л.Н., Волкова С.Г., Иванков А.Н. Принципы размещения контейнерных терминалов при формировании опорной сети транспортно-логистических комплексов // Современные методы, принципы и системы автоматизации управления на транспорте : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Нижний Новгород, 2016. С. 71–77.
5. Российские железные дороги : сайт / ОАО «РЖД». URL: <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 31.08.2023).
6. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Декомпозиция основных бизнес-процессов и зоны формирования рисков железнодорожной транспортной системы в сфере грузовых перевозок // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 4 (63). С. 44–52.
7. Динец Д.А., Никитин А.А. Финансовые аспекты функционирования современного рынка нефти // Геоэкономика энергетики. 2022. Т. 17. № 1. С. 47–60.
8. Динец Д.А., Меркулов А.С. Применение принципа управления транспортным коридором к организации деятельности Транссибирской магистрали // Транспортное право и безопасность. 2021. № 3 (39). С. 49–56.
9. Урожай зерновых культур в Красноярском крае выше уровня прошлого года // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации : сайт. URL : <https://mcx.gov.ru/press-service/regions/urozhay-zernovyykh-kultur-v-krasnoyarskom-krae-vyshe-urovnya-proshlogo-goda> (Дата обращения 29.08.2023).
10. Абалонин С.М. Конкурентоспособность транспортных услуг. М. : Академкнига, 2004. 172 с.
11. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Формирование новых транспортно-логистических подходов при организации перевозок зерновых грузов на железнодорожном транспорте // Постсоветский материк. 2022. № 4 (36). С. 83–92.
12. Перфильева П.В., Кашкарев А.С., Власова Н.В. Инновационные методы и логистические подходы к организации грузовой и коммерческой деятельности Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом // Наука молодых – будущее России : сб. науч. ст. 6-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2021. Т. 5. С. 146–149.
13. Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole / M.V. Konstantinova, V.Yu. Konyukhov, E.A. Guseva et al. // Materials Science and Engineering : international Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS : 2020. С. 012020. DOI:10.1088/1757-899X/1064/1/012020.
14. Фуфачева М.В. Исследование коэффициента неравномерности грузопотоков // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : тр. XXV Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 2021. Т. 1. С. 159–164.
15. Криворотов А.А., Григорьева Н.Н. Инфраструктура восточного полигона: реальность и перспективы // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : тр. Всерос. науч.-практ. конф. 2022. Т. 1. С. 330–334.
16. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Куныгина Л.В. Совершенствование схем и технологии работы решающих технических и грузовых станций Восточного полигона // Современные подходы к управлению на транспорте и в логистике : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. М., 2016. С. 52–56.

17. Тюкавкин Е.А., Григорьева Н.Н. Тенденции развития рынка транспортных услуг в рамках Восточного полигона // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2022. Т. 1. С. 380–385.
18. Направления развития и совершенствования перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Доставка грузов «точно в срок» / Д.С. Добрынина, А.Н. Власова, А.А. Оленцевич и др. // Молодая наука Сибири : электрон. журн. 2019. № 1 (3). С. 39–47. URL: <https://mnv.irgups.ru/napravleniya-razvitiya-i-sovershenstvovaniya-perevochnogo-processa-na-zheleznodorozhnom-transporte> (Дата обращения 01.09.2023).
20. Канин П.В., Федотов С.А., Файзрахманова Е.В. Повышение эффективности работы складских комплексов // Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала предприятий, отраслей и народно-хозяйственных комплексов : сб. ст. XIV Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2023. С. 108–111.
21. Булохова Т.А., Леонтьева В.В. Клиентоориентированный подход в повышении качества обслуживания клиентов железнодорожного транспорта // Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала предприятий, отраслей и народно-хозяйственных комплексов : сб. ст. XIII Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2022. С. 32–35.

## References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda (Elektronnyi resurs) [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 (Electronic resource)]. Available at: <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Accessed September 1, 2023).
2. Rasporiazhenie ОАО «RZHD» ot 07.12.2016 g. № 2487r «Ob utverzhdenii kontseptsii klientoorientirovannosti kholdinga «RZHD» v oblasti gruzovykh perevozok» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 7, 2016 no 2487r «The concept of customer orientation of the Russian Railways Holding in the field of freight transportation»].
3. Gruzy gotovy ekhat'. ОАО «RZHD» prognoziruet rekordnye eksportnye perevozki v 2022 godu (Elektronnyi resurs) [The loads are ready to go. JSC «Russian Railways» predicts record export shipments in 2022 (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1593862/> (Accessed August 29, 2023).
4. Ivankova L.N., Volkova S.G., Ivankov A.N. Printsipy razmeshcheniya konteynernykh terminalov pri formirovani opornoj seti transportno-logisticheskikh kompleksov [Principles of placement of container terminals in the formation of a backbone network of transport and logistics complexes]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennyye metody, printsipy i sistemy avtomatizatsii upravleniya na transporte»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Modern methods, principles and systems of automation of control in transport»]. Nizhny Novgorod, 2016, pp. 71–77.
5. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed August 31, 2023).
6. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Dekompozitsiya osnovnykh biznes-protsessov i zony formirovaniya riskov zheleznodorozhnoi transportnoi sistemy v sfere gruzovykh perevozok [Decomposition of the main business processes and risk zones of the railway transport system in the field of freight transportation]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2022, no. 4 (63), pp. 44–52.
7. Dinets D.A., Nikitin A.A. Finansovye aspekty funktsionirovaniya sovremennogo rynka nefi [Financial aspects of the functioning of the modern oil market]. *Geoekonomika energetiki* [Goeconomics of energy], 2022, vol. 17, no. 1, pp. 47–60.
8. Dinets D.A., Merkulov A.S. Primenenie printsipa upravleniya transportnym koridorom k organizatsii deyatelnosti Transsibirskoi magistrali [Application of the principle of transport corridor management to the organization of the Trans-Siberian Railway]. *Transportnoe pravo i bezopasnost'* [Transport Law and security], 2021, no. 3 (39), pp. 49–56.
9. Urozhai zernovykh kul'tur v Krasnoyarskom krae vyshe urovnya proshlogo goda (Elektronnyi resurs) [The harvest of grain crops in the Krasnoyarsk Territory is higher than last year (Electronic resource)]. Available at: <https://mcx.gov.ru/press-service/regions/urozhay-zernovykh-kultur-v-krasnoyarskom-krae-vyshe-urovnya-proshlogo-goda/> (Accessed August 29, 2023).
10. Abalotin S.M. Konkurentosposobnost' transportnykh uslug [Competitiveness of transport services]. Moscow: Akademiya Publ., 2004. 172 p.
11. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Formirovanie novykh transportno-logisticheskikh podkhodov pri organizatsii perevozok zernovykh gruzov na zheleznodorozhnom transporte [Formation of new transport and logistics approaches in the organization of grain cargo transportation by rail]. *Postsovetskii materik* [Post-Soviet continent], 2022, no. 4 (36), pp. 83–92.
12. Perfil'eva P.V., Kashkarev A.S., Vlasova N.V. Innovatsionnye metody i logisticheskie podkhody k organizatsii gruzovoi i kommercheskoi deyatelnosti Vostochno-Sibirskoi direktсии po upravleniyu terminal'no-skladskim kompleksom [Innovative methods and logistic approaches to the organization of cargo and commercial activities of the East Siberian Directorate for Terminal and Warehouse Complex Management]. *Sbornik nauchnykh statei 6-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh «Nauka molodykh – budushchee Rossii»* [Proceedings of the 6th International Scientific Conference of Promising developments of Young Scientists «Science of the Young People – Future of the Russia»]. Kursk, 2021, vol. 5, pp. 146–149.
13. Konstantinova M.V., Konyukhov V.Y., Guseva E.A., Olentsevich A.A., Olentsevich V.A. Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. «International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2020» 2021. P. 012020.
14. Fufacheva M.V. Issledovanie koeffitsienta neravnomernosti gruzopotokov [Investigation of the coefficient of unevenness of cargo flows]. *Trudy XXV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the XXV All-Russian Scientific and Practical Conference «Innovative technologies in railway

transport»]. Krasnoyarsk, 2021, vol. 1, pp. 159–164.

15. Krivorotov A.A., Grigor'eva N.N. Infrastruktura vostochnogo poligona: real'nost' i perspektivy [Infrastructure of the Eastern polygon: reality and prospects]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asian-Pacific Region countries in the XXI century], 2022, Vol. 1, pp. 330–334.

16. Ivankova L.N., Ivankov A.N., Kunygina L.V. Sovershenstvovanie skhem i tekhnologii raboty reshayushchikh tekhnicheskikh i gruzovykh stantsii Vostochnogo poligona [Improvement of schemes and technology of operation of crucial technical and cargo stations of the Eastern polygon]. *Sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye podkhody k upravleniyu na transporte i v logistike»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Modern approaches to management in transport and logistics»]. Moscow, 2016, pp. 52–56.

17. Tyukavkin E.A., Grigor'eva N.N. Tendentsii razvitiya rynka transportnykh uslug v ramkakh Vostochnogo poligona [Trends in the development of the transport services market within the Eastern Polygon]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asian-Pacific Region countries in the XXI century], 2022, vol. 1, pp. 380–385.

18. Dobrynina D.S., Vlasova A.N., Olentsevich A.A., Belogolov Yu.I. Napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya perevozhnogo protsessa na zheleznodorozhnom transporte. Dostavka gruzov «tochno v srok» [Directions of development and improvement of the transportation process in railway transport. Cargo delivery «just in time»]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2019, no. 1 (3), pp. 39–47.

20. Kanin P.V., Fedotov S.A., Faizrahmanova E.V. Povyshenie effektivnosti raboty skladskikh kompleksov [Improving the efficiency of warehouse complexes]. *Sbornik statei XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Povyshenie upravlencheskogo, ekonomicheskogo, sotsial'nogo i innovatsionno-tekhnicheskogo potentsiala predpriyatii, otraslei i narodno-khozyaistvennykh kompleksov»* [Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference «Improving the managerial, economic, social and innovative-technical potential of enterprises, industries and national economic complexes»]. Penza, 2023, pp. 108–111.

21. Bulokhova T.A., Leont'eva V.V. Klientoorientirovannyi podkhod v povyshenii kachestva obsluzhivaniya klientov zheleznodorozhno transporta [Client-oriented approach in improving the quality of customer service of railway transport]. *Sbornik statei XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Povyshenie upravlencheskogo, ekonomicheskogo, sotsial'nogo i innovatsionno-tekhnicheskogo potentsiala predpriyatii, otraslei i narodno-khozyaistvennykh kompleksov»* [Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference «Improving the managerial, economic, social and innovative-technical potential of enterprises, industries and national economic complexes»]. Penza, 2022, pp. 32–35.

#### Информация об авторах

**Оленцевич Виктория Александровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olencevich\_va@mail.ru.  
**Власова Наталья Васильевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: natalya.vlasova.76@list.ru.

#### Information about the authors

**Victoriya A. Olentsevich**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olencevich\_va@mail.ru.  
**Natal'ya V. Vlasova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: natalya.vlasova.76@list.ru.

## Предпосылки изменения схемы движения автотранспорта на терминале

Д.Ю. Гришкова✉

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉raigas@inbox.ru

### Резюме

В статье рассмотрен контейнерный терминал «Е». Основной задачей компании «Е», как и любой другой коммерческой структуры, является получение прибыли. Прибыль – не только инструмент удовлетворения нужд организации, но и способ ее развития при правильном вложении полученных средств, что тоже считается важным фактором. Также компании необходимо расширять свое производство или модернизировать его, чтобы не только повышать свои доходы, но и оставаться конкурентоспособной на рынке. В нашем случае компания выбрала путь модернизации: вложить часть полученной прибыли в строительство новой площадки для стоянки автотранспорта и оптимизировать схему его передвижения по территории терминала, что в дальнейшем поможет нарастить контейнерооборот и расширить емкости контейнерной площадки. В работе выполнен анализ существующей схемы движения автотранспорта на терминале, отмечены основные недостатки. Изучены причины ожидания автотранспорта на территории терминала и простоя при различных операциях с помощью диаграммы Исикавы. Установлено, что основная причина простоя автотранспортных средств на терминале – перегруженность парковки, которая возникает из-за неравномерного прибытия автотранспорта. Выполнен анализ объема работы терминала по месяцам. Выявлено, что самым напряженным месяцем является март. Определены максимальные, минимальные и средние размеры прибытия автотранспортных средств на терминал. Посредством графических зависимостей в результате обработки статистических данных получены графики распределения автомобилей по суточным интервалам. На основании графиков сделан вывод, что распределение автомобилей носит случайный характер, что может вызывать затруднения в работе терминала. С учетом суточных интервалов прибытия транспорта созданы три модели работы терминала в программе AnyLogic. Имитационное моделирование подтвердило, что схема движения автотранспорта внутри терминала требует доработки, а также указало на недостаточность одной парковки.

### Ключевые слова

контейнерный терминал, схема движения, парковка автомобилей, интервалы прибытия, диаграмма Исикавы, имитационное моделирование

### Для цитирования

Гришкова Д.Ю. Предпосылки изменения схемы движения автотранспорта на терминале / Д.Ю. Гришкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 87–96. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).87-96.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 23.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 26.09.2023 г.; принята к публикации: 27.09.2023 г.

## Prerequisites for changing the traffic pattern at the terminal

D.Yu. Grishkova✉

Siberian Transport University, Novosibirsk, the Russian Federation

✉raigas@inbox.ru

### Abstract

The article considers the container terminal E. The main task of the company «E», like any other, is to make profit. Profit is not only a tool to meet the needs of the organization but, with proper investment, a way of development which is also an important factor. The company needs to expand its production or modernize it in order not only to increase its revenues, but also to remain competitive in the market. In this case, the company has chosen the path of modernization: to invest part of the profit received in the construction of a new parking area for vehicles and optimize the scheme of movement of vehicles through the terminal, which will further help the growth of container turnover and expansion of the container site capacity. The analysis of the existing traffic pattern at the terminal is carried out, the main drawbacks are noted. The reasons for waiting of vehicles on the territory of the terminal and downtime during various operations are analyzed using the Ishikawa diagram. It is established that the main reason for the downtime of vehicles at the terminal is the congestion of parking, which occurs due to the uneven arrival of vehicles and lack of parking space. The analysis of the terminal's work volume by month has been performed. It is revealed that the most stressful month is March. The maximum, minimum and average values of vehicles' arrival at the terminal are determined. By means of graphical dependencies, as a result of statistical data processing, graphs of the distribution of cars by daily intervals are obtained. Based on the graphs, it is concluded that the distribution of cars is random, which may cause difficulties in the operation of the terminal. With the daily arrival intervals considered, three terminal operation models have been created in the AnyLogic program. Simulation modeling confirmed the imperfection of the traffic pattern inside the terminal and the insufficiency of one parking lot.

**Keywords**

container terminal, traffic diagram, car parking, arrival intervals, Ishikawa diagram, simulation modeling

**For citation**

Grishkova D.Yu. Predposylki izmeneniya skhemy dvizheniya avtotransporta na terminale [Prerequisites for changing the traffic pattern at the terminal]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, то. 3(79), pp. 87–96. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).87-96.

**Article Info**

Received: September 23, 2023; Revised: September 26, 2023; Accepted: September 27, 2023.

**Введение**

Компания «Е» с 1992 г. предоставляет комплексное транспортно-логистическое обслуживание [1, 2]. В городе Н находится терминально-логистический центр (ТЛЦ), головной офис расположен в городе С-П. ТЛЦ был введен в эксплуатацию в 2008 г. и на сегодняшний день включает:

- таможенный пост В (с 2009 г.);
- примыкание к станции И;
- примыкание к трассам «С-ый обход» и «С»;
- свидетельство о включении его в реестр владельцев складов временного хранения (СВХ);
- ERP-систему, которая позволяет отслеживать контейнеры в онлайн-режиме.

Параметры терминала:

- общая площадь – 30,8 га;
- емкость контейнерной площадки – 4 500 TEU;
- объем обработки контейнеров до 100 тыс. TEU в год;
- отопляемые склады классов «А» и «В», каждый площадью 10 тыс. м<sup>2</sup>;
- площадь контейнерной площадки – 5,7 га;
- емкость единовременного хранения грузов – 6 000 TEU [3].

Услуги, оказываемые терминалом: транспортно-экспедиционное обслуживание, экспедирование в портах Дальнего Востока (ДВ), фрахт через порты ДВ, отправка контейнерных поездов, обработка контейнеров, перегруз и хранение, таможенная очистка грузов [4, 5].

Терминал работает на экспортно-импортные перевозки со странами Юго-Восточной Азии, также осуществляет транспортное обслуживание внутренних клиентов. На терминале есть пять ричстакеров «Kalmar», одновременно для работы выводится четыре средства механизации. В настоящее время в

работе терминала имеется проблема ожидания занятия парковочных мест автотранспортом для осуществления погрузочно-разгрузочных работ (ППР) с контейнерными грузами.

Посредством статистической обработки и имитационного моделирования проанализируем причины ожидания автомобилей в процессе выполнения технологических операций [6, 7].

**Существующая схема движения автотранспорта**

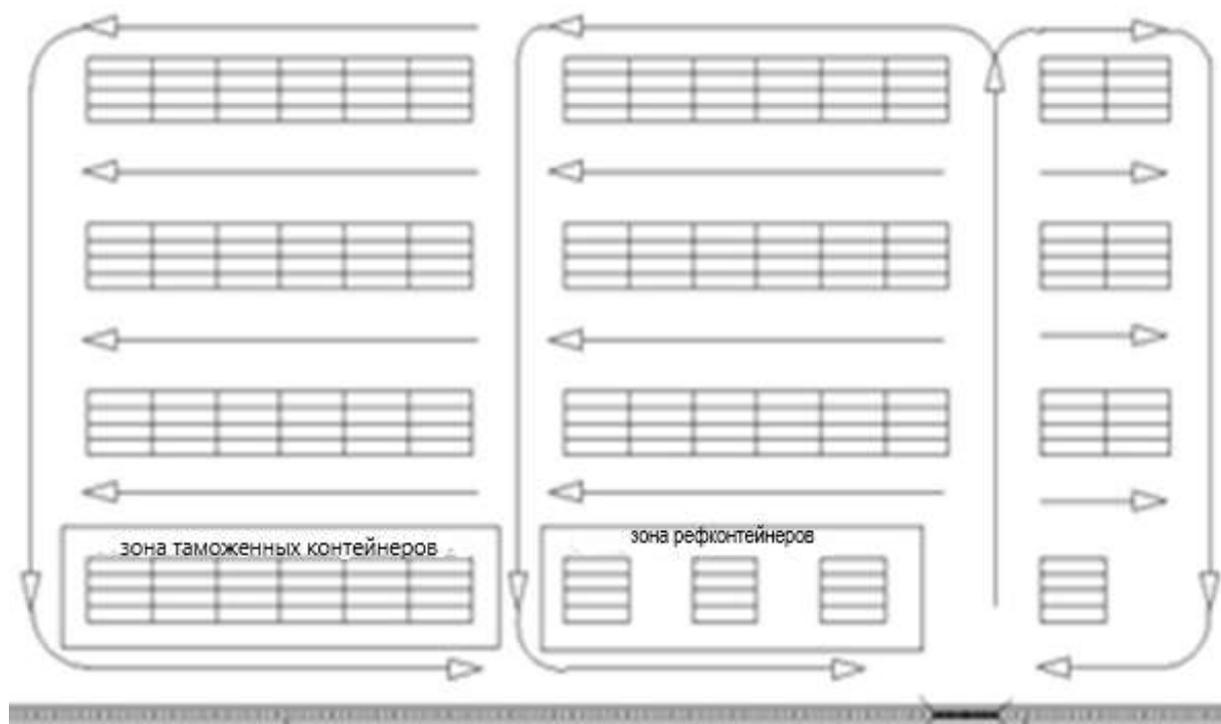
На территории терминала «Е» осуществляются следующие процессы: прием груженых контейнеров, прием порожних контейнеров, отправка порожних контейнеров, отправка груженых контейнеров, растарка контейнеров, перетарка, работа с рефрижераторными контейнерами, ремонт контейнеров и их взвешивание [8].

Для перевозки контейнеров на терминале клиенты используют следующие автотранспортные средства: контейнеровозы марки «Skania» различных типов, «IVECO-AMT 633941» (для перевозки 20-футового контейнера по всем видам дорог), КАМАЗ, MAN, Mercedes-Benz 3346A, Renault, DAF XF 460 и DAF XF 480.

Данные автомобили являются типовыми для перевозки различных контейнеров по всем видам дорог, что оптимально для Российской Федерации и территории других государств [9].

Контейнеры на терминале формируются в стеки – группа контейнеров одного назначения или одной конфигурации. Каждый стек имеет свой порядковый номер. Нумерация стеков определяется по времени их возникновения на терминале, этим объясняется неравномерность порядковых номеров [10, 11].

Существующая на данный момент схема перемещения автотранспорта по территории терминала представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Существующая схема движения автотранспорта по территории терминала  
**Fig. 1.** The existing scheme of vehicle traffic on the terminal territory

Преимущество данной схемы заключается в простоте и удобстве использования для водителей и работников, однако имеется и ряд недостатков:

- наличие враждебных маршрутов из-за пересечения путей нескольких автомобилей;
- пересечение железнодорожного пути с путями автомобилей, что создает задержки автотранспорта на территории;
- невозможность использования этой схемы при введении в эксплуатацию запланированной терминалом дополнительной парковочной площадки.

Причины ожидания автотранспорта на территории терминала и простоя при различных операциях рассмотрены и систематизированы при помощи диаграммы Исикавы (рис. 2) [12, 13].

Рассмотрены такие причины, как перегруженность парковки; закрытие переезда при въезде на территорию контейнерного терминала и при выезде с нее; несовершенство схемы движения; дополнительные лифты (поднятие контейнера ричстакером) при производстве ПРР; высокая загруженность приемосдатчиков.

Парковка рассчитана на 10–15 автомобилей, поэтому она не отвечает требуемым усло-

виям в период, когда интенсивность прибытия автомобилей значительно превышает ее возможности. Данная проблема возникает из-за того, что автомобили приезжают неравномерно. В настоящих условиях решить ее не удастся. Закрытие переезда – обычно плановая задержка, которой нельзя избежать при существующей схеме движения и даже при создании оптимальной схемы.

Дополнительные лифты при ПРР возникают из-за нерационального размещения контейнеров в стеках или в связи с тем, что клиенты могут передумать забирать контейнер и взять другой.

В сложившихся условиях эксплуатации терминала наиболее актуальным становится вопрос оптимизации схемы движения автотранспорта внутри терминала. Анализ особенностей существующей схемы движения приведен на рис. 3 [14, 15].

Таким образом, можно отметить, что основная причина простоя автотранспортных средств на терминале – перегруженность парковки, которая возникает из-за скученного прибытия автотранспорта и недостатка места на парковке.

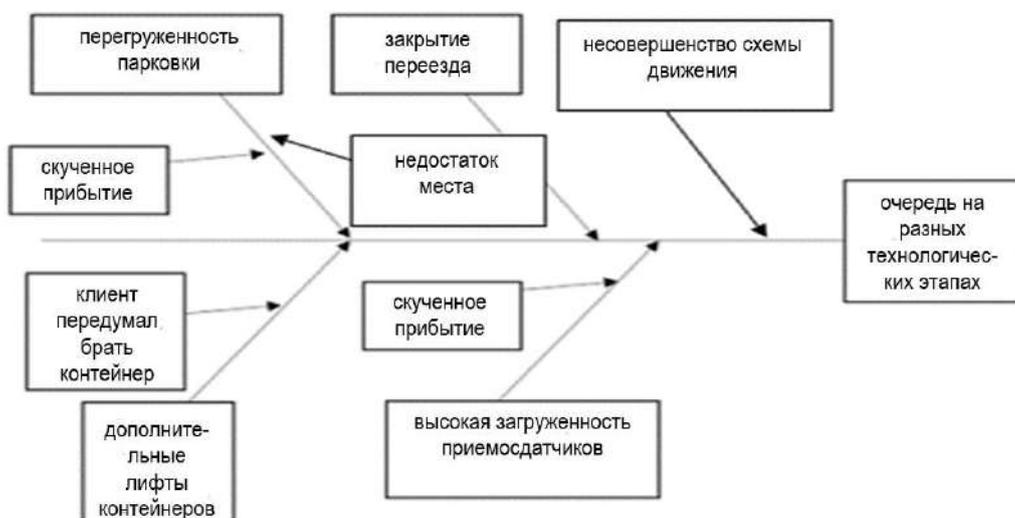


Рис. 2. Причинно-следственные связи простоя автотранспорта на терминале

Fig. 2. Causal relationships of vehicle downtime at the terminal



Рис. 3. Диаграмма зависимостей для схемы движения

Fig. 3. Dependency diagram for the traffic pattern

### Распределение автомобилей по суточным интервалам

Согласно статистическим данным, собранным ежемесячно по работе терминала, можно отметить, что максимальные объемы работы приходятся на март. Максимальное количество прибывающих автомобилей за день составило 326, минимальное – 97.

Среднее число автомобилей в месяц:

$$n_{\text{ср}} = \frac{\sum n_i}{31},$$

где  $n_i$  – число автомобилей за каждый день, шт;  
31 – число дней в марте.

$$n_{\text{ср}} = \frac{6811}{31} = 219,71 \text{ автомобилей.}$$

Самое близкое число к среднему – 223 автомобиля за один из дней марта. Данный день также был выбран для анализа прибытия автомобилей.

Анализ прибытия/отправления автомобилей проводился по следующим показателям:

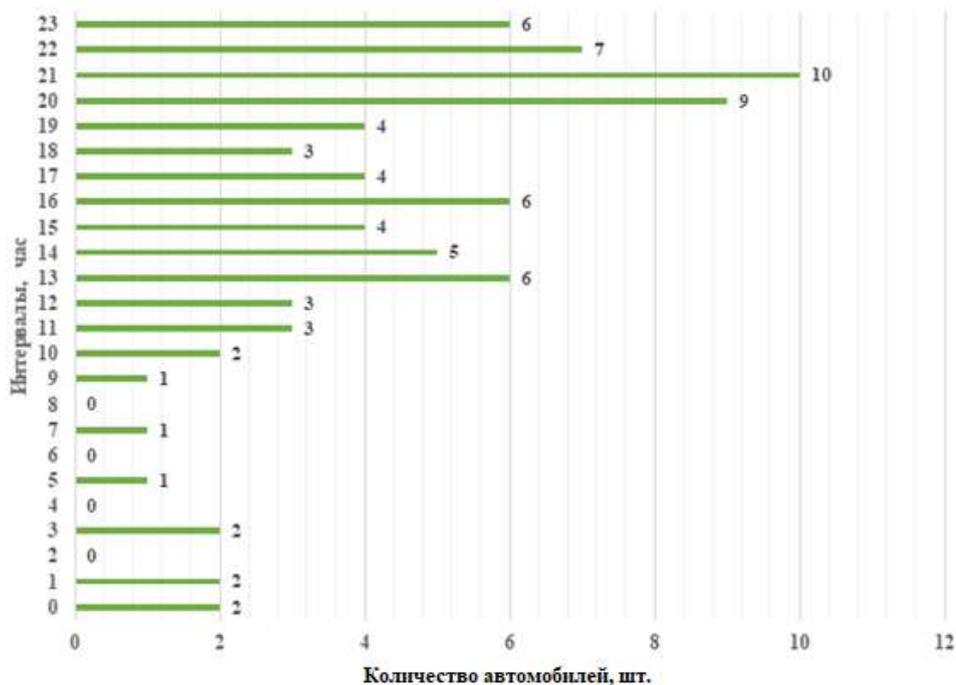
- время прибытия;
- интервал между автомобилями;
- время отправления;
- время, проведенное на терминале;

– количество автомобилей в интервале каждого часа суток;

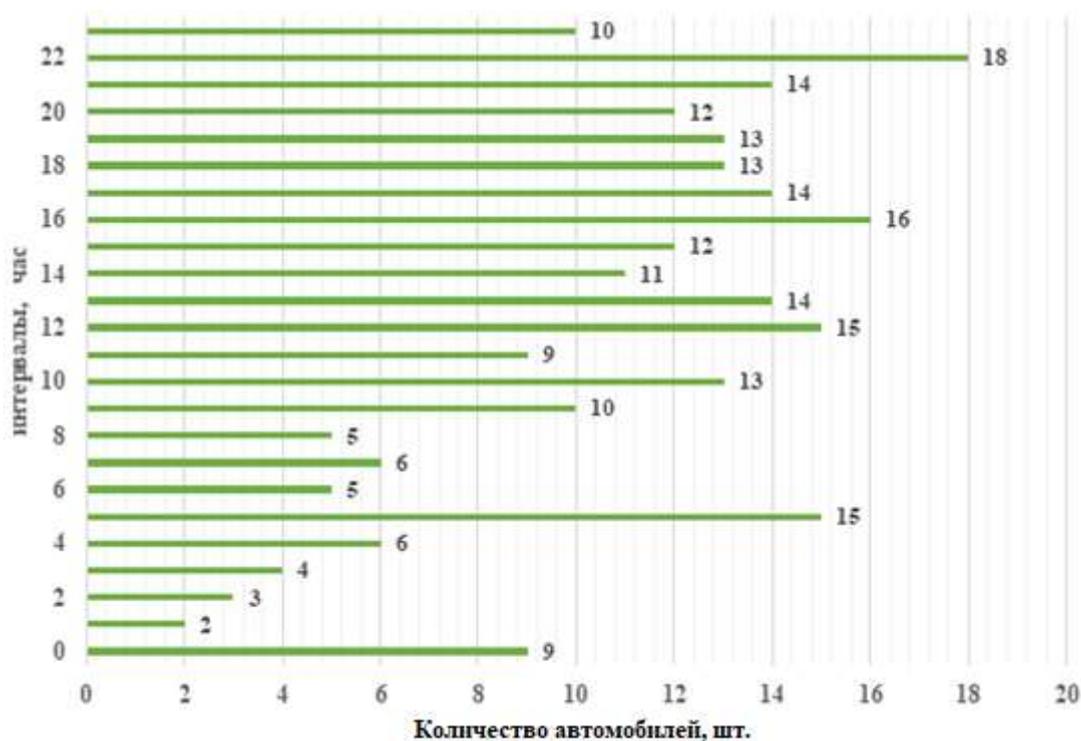
– количество двояных операций (автомобиль разгружает контейнер и сразу едет грузить новый).

Данные для анализа взяты из журнала охраны.

Для наглядного сравнения распределение автомобилей по суточным интервалам отображено на диаграммах (рис. 4).



a



b

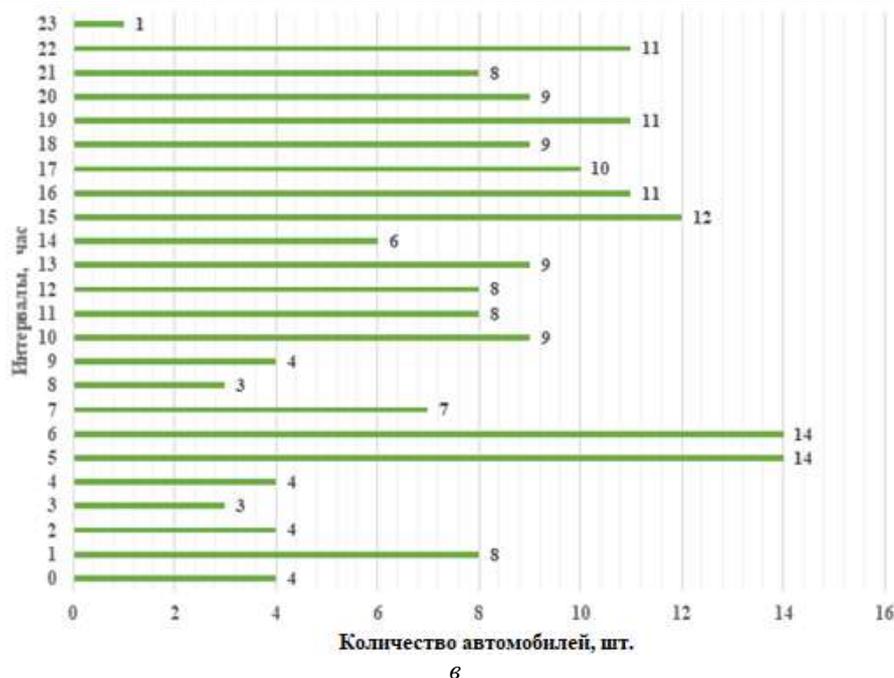


Рис. 4. Распределение автомобилей по суточным интервалам в соответствии с объемами работ:

*a* – минимальные объемы; *b* – максимальные объемы; *c* – средние объемы

Fig. 4. Distribution of vehicles by daily intervals in accordance with the scope of work:

*a* – minimum volumes; *b* – maximum volumes; *c* – average volumes

Из диаграмм видно, что распределение автомобилей неравномерное и носит случайный характер.

Также с помощью наружных камер видеонаблюдения был проведен анализ движения автотранспорта в течение рабочего дня. За временные маркеры были взяты:

- время прибытия автомобиля на терминал;
- начало движения после всех процедур оформления;
- прибытие к пункту погрузки/разгрузки;
- начало погрузки/разгрузки;
- окончание погрузки/разгрузки;
- прибытие на контрольно-пропускной пункт (КПП) после погрузки/разгрузки;
- выезд с терминала.

Для наглядности на рис. 5 представлен график задержки по времени на все операции с автомобилем.

На данном графике видно, что транспорт дольше всего стоит на парковке в ожидании оформления, в которое также заложено время на ожидание очереди на автостоянке.

На основании суточных интервалов прибытия в программе AnyLogic была создана модель работы терминала для средних значений

прибытия автотранспорта, представленная на рис. 6 [16].

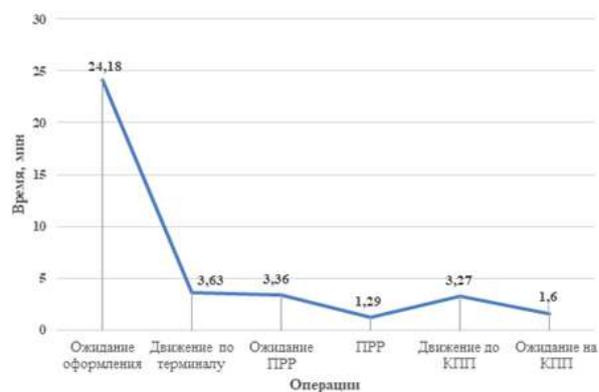
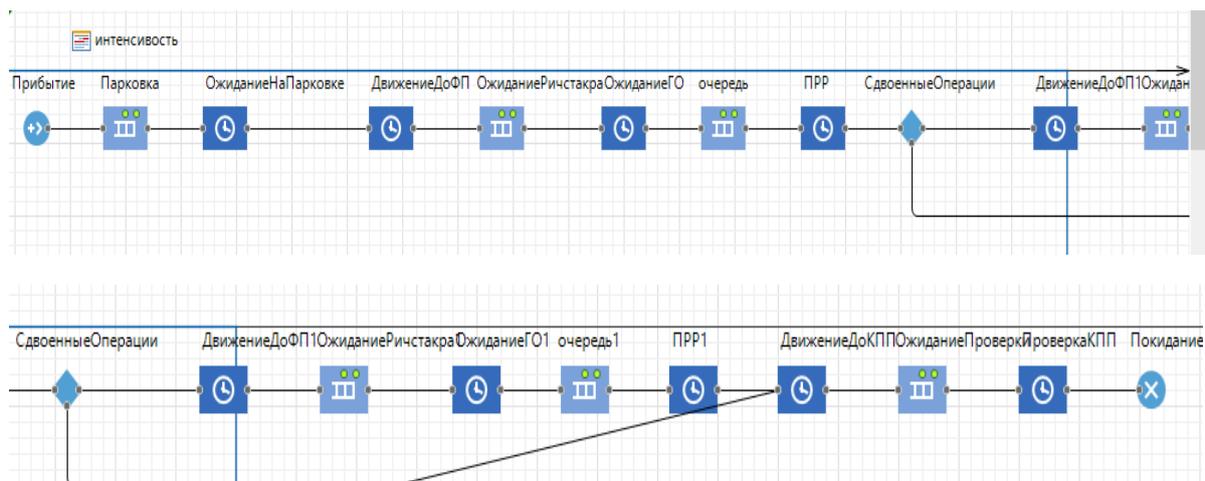


Рис. 5. Распределение времени на операции с автотранспортом

Fig. 5. Distribution of time for operations with vehicles

Все операции выполнял агент-фура.

Вначале каждый автомобиль прибывает на парковку (блоки «Прибытие» и «Парковка») и переходят в режим «Ожидание на парковке», в который входит оформление перевозочных документов и проверка приемосдатчиком груза и багажа и составляет по времени 10–20 мин. [17, 18].



**Рис. 6.** Имитационная модель работы терминала для средних значений прибытия автотранспорта  
**Fig. 6.** Simulation model of the terminal operation for the average values of the vehicle arrival

После оформления автомобиль движется до пункта ПРР (блок «Движение до ФП»), что по времени составляет до 10 мин.

Далее идут операции «Ожидание ричстакера» (формируется с помощью блока «очередь» по числу одновременно работающих ричстакеров, обычно их три) и «Ожидание ГО» – ожидание грузовой операции (время на ожидание ричстакера 1–10 мин.).

Блок «очередь» является вспомогательным для нормальной работы модели [19, 20].

Затем поток автомобилей разделяется: часть движется на КПП, вторая часть отправляется на повторную загрузку.

Блок «сдвоенных операций» повторяет пять предыдущих блоков.

«Движение до КПП» составляет по времени до 10 мин., «Ожидание проверки» и «Проверка КПП» подразумевают проверку на КПП (выполняется примерно по пять автомобилей по времени до 5 мин.), после чего маши-

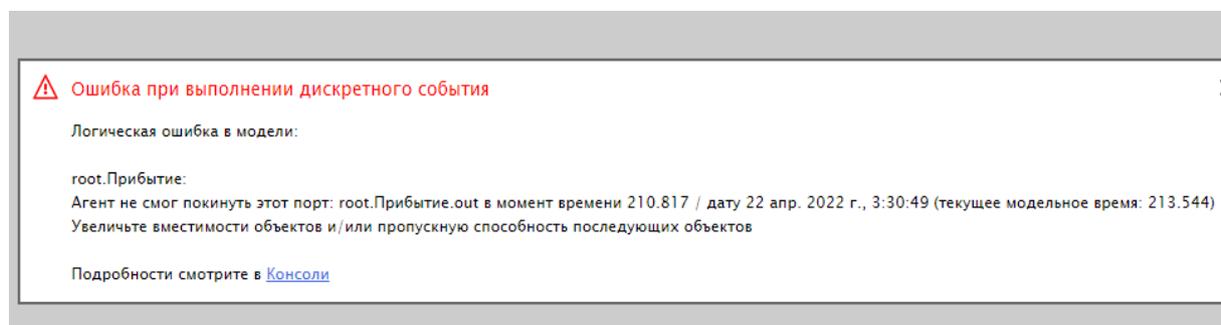
ны покидают терминал.

Результаты работы модели за день с максимальным прибытием автотранспорта приведены на рис. 7.

По рис. 7 видно, что после события «Прибытие на контейнерный терминал» автомобиль не смог переместиться на парковку, так как она была переполнена. Тот же результат можно наблюдать в работе модели при минимальных и средних значениях. Ввиду того, что терминал планирует наращивать размеры прибытия автомобилей, можно предположить, что занятость парковки будет лимитироваться в осуществлении технологических операций.

## Заключение

Существующая схема движения автотранспорта на терминале и наличие одной парковки при имеющихся объемах не являются оптимальным решением, исключая или сокращающим ожидание автотранспортом опе-



**Рис. 7.** Результат работы модели при максимальных значениях прибытия автотранспорта  
**Fig. 7.** The result of the model operation at the maximum values of the vehicle arrival

раций. Следовательно, для нормального функционирования терминала и уменьшения времени ожидания целесообразно добавить еще одну парковку и изменить маршруты движения автотранспорта внутри терминала.

### Список литературы

1. Алешина А. Контейнеризация в России переживает эпоху развития // РЖД-Партнер.Ру : сайт. URL : <https://www.rzd-partner.ru/logistics/interview/konteynerizatsiya-v-rossii-perezhivaet-epokhu-razvitiya> (Дата обращения 15.09.2023).
2. Покровская О.Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 26–32.
3. Гришкова Д.Ю. Анализ транспортно-логистической инфраструктуры Новосибирской области // Глобальная экономика в XXI веке: роль биотехнологий и цифровых технологий : сб. науч. ст. по итогам работы второго круглого стола с междунар. участием. М., 2020. С. 170–172.
4. Покровская О.Д. Принципы реализации комплексных транспортно-логистических услуг на железнодорожном транспорте и требования к ним // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2020. Т. 17. № 3. С. 288–303.
5. Покровская О.Д. Логистический накопительно-распределительный центр как инфраструктурная основа международных транспортных коридоров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 12-1. С. 118–121.
6. Формирование узловых мультимодальных транспортно-логистических центров / С.Э. Ольховиков, Е.А. Петренева, И.Н. Кагадий и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2023. № 1 (89). С. 106–118.
7. Прокофьева Т.А., Ювица В.Н. Создание опорной сети логистических центров на основных направлениях товародвижения в системе международных транспортных коридоров // Транспорт: наука, техника, управление. 2007. № 8. С. 62–65.
8. Sgouridis S., Markis D., Angelides D. Simulation Analysis for Midterm Yard Planning in Container Terminal // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 2003. Vol. 129. Iss. 4. P. 178–187. DOI 10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:4(178).
9. Оленевич В.А., Зюванова А.О., Ефимов В.О. Совершенствование организации работы системы контейнерных терминалов железнодорожного транспорта // Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции : сб. ст. по материалам всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2022. Т. 2. С. 158–163.
10. Гришкова Д.Ю. Определение перерабатывающей способности терминала при различных условиях работы // Заметки ученого. 2021. № 1. С. 30–34.
11. Орехова А.Е., Гришкова Д.Ю. Разработка стратегий в сфере логистики // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков : сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф. М., 2022. С. 502–509.
12. Седашкин А.Д. Управление качеством продукции на основе статистического моделирования процесса расчета выборок // Наука и молодежь : XIX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Барнаул, 2022. Т. 1. Ч. 1. С. 53–54.
13. Гришкова Д.Ю., Тельнов Н.А. Использование инструментариев и методов бережливого производства в грузовой и коммерческой работе. Опыт внедрения в ОАО «РЖД» и на других видах транспорта // Вызовы глобализации и развития цифрового общества в условиях новой реальности : сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. М., 2023. С. 59–66.
14. Нижегородцев Р.М. Обобщенная диаграмма Исикавы как инструмент факторного анализа // Друкерровский вестник. 2017. № 6 (20). С. 15–24.
15. Гришкова Д.Ю., Тесленко И.О. Бережливое производство как основа повышения производительности труда // Сб. науч. тр. Донецк. ин-та ж.-д. трансп. 2018. № 51. С. 45–52.
16. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Щербакова-Слюсаренко В.Н. Бенчмаркинговые показатели в технологическом проектировании контейнерных терминалов // Вестн. гос. ун-та морск. и речн. флота им. адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 1. С. 7–19.
17. Кузнецов А.Л., Козлова Е.Ю. Сравнение различных методик оценки требуемой вместимости склада при технологическом проектировании контейнерных терминалов // Эксплуатация морского транспорта. 2008. № 4 (54). С. 9–14.
18. Король Р.Г. Имитационное моделирование пропускной способности автомобильного пограничного перехода «Кани-Курган (РФ) – Хэйхэ (КНР)» // Вестн. Москов. автомобильно-дорожн. гос. техн. ун-та (МАДИ). 2023. № 1 (72). С. 42–49.
19. Джиоев А.З. Инновации в системах управления контейнерными терминалами // Системный анализ и логистика. 2013. № 10. С. 4–8.
20. Нургалиев Е.Р. Имитационное моделирование технико-технологических параметров автомобильных перевозок в логистической цепи // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика. 2016. Т. 4. № 5-3 (25-3). С. 320–325.

### References

1. Konteynerizatsiya v Rossii perezhivaet epokhu razvitiya (elektronnyi resurs) [Containerization in Russia is experiencing an era of development (electronic resource)]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/interview/konteynerizatsiya-v-rossii-perezhivaet-epokhu-razvitiya/> (Accessed September 15, 2023).
2. Pokrovskaya O.D. Kompleksnaya otsenka transportno-skladskikh sistem [Comprehensive assessment of transport and storage systems]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2019, no. 7, pp. 26–32.
3. Grishkova D.Yu. Analiz transportno-logisticheskoi infrastruktury Novosibirskoi oblasti [Analysis of the transport and logistics infrastructure of the Novosibirsk region]. *Sbornik nauchnykh statei po itogam raboty vtorogo kruglogo stola s mezhdunarodnym uchastiem* [Collection of scientific articles on the results of the second round table with international participation]. Moscow, 2020. P. 170–172.

narodnym uchastiem «Global'naya ekonomika v XXI veke: rol' biotekhnologii i tsifrovyykh tekhnologii» [Proceedings of scientific articles based on the results of the second round table with international participation «The Global Economy in the XXI century: the role of biotechnologies and digital technologies»]. Moscow, 2020, pp. 170 – 172.

4. Pokrovskaya O.D. Printsipy realizatsii kompleksnykh transportno-logisticheskikh uslug na zheleznodorozhnom transporte i trebovaniya k nim [Principles of implementation of complex transport and logistics services on railway transport and requirements for them]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Saint Petersburg State Transport University], 2020, vol. 17, no. 3, pp. 288–303.

5. Pokrovskaya O.D. Logisticheskii nakopitel'no-raspredelitel'nyi tsentr kak infrastruktural'naya osnova mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Logistics storage and distribution center as the infrastructural basis of international transport corridors]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of humanities and natural sciences], 2013, no. 12-1, pp. 118–121.

6. Ol'khovikov S.E., Petreueva E.A., Kagadii I.N., Sherstobitova O.B. Formirovanie uzlovykh mul'timodal'nykh transportno-logisticheskikh tsentrov [Formation of nodal multimodal transport and logistics centers]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2023, no. 1(89), pp. 106–118.

7. Prokof'eva T.A., Yuvitsa V.N. Sozdanie opornoi seti logisticheskikh tsentrov na osnovnykh napravleniyakh tovarovdizheniya v sisteme mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Creation of a support network of logistics centers in the main directions of goods movement in the system of international transport corridors]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific Information Proceedings]. 2007, no. 8, pp. 62–65.

8. Sgouridis S., Markis D., Angelides D. Simulation Analysis for Midterm Yard Planning in Container Terminal. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2003, vol. 129, iss. 4, pp. 178–187.

9. Olentsevich V.A., Zyuvanova A.O., Efimov V.O. Sovershenstvovanie organizatsii raboty sistemy konteynernykh terminalov zheleznodorozhnogo transporta [Improving the organization of the railway container terminal system]. *Sbornik statei po materialam vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Baikal'skaya nauka: idei, innovatsii, investitsii»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference «Baikal science: ideas, innovations, investments»]. Irkutsk, 2022, vol. 2, pp. 158–163.

10. Grishkova D.Yu. Opredelenie pererabatyvayushchei sposobnosti terminala pri razlichnykh usloviyakh raboty [Determination of the processing capacity of the terminal under various operating conditions]. *Zametki uchenogo* [Notes of the scientist], 2021, no. 1, pp. 30–34.

11. Orekhova A.E., Grishkova D.Yu. Razrabotka strategii v sfere logistiki [Development of strategies in the field of logistics]. *Sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitie nauki i praktiki v global'no menyayushchimsya mire v usloviyakh riskov»* [Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference «Development of science and practice in a globally changing world under risk conditions»]. Moscow, 2022, pp. 502–509.

12. Sedashkin A.D. Upravlenie kachestvom produktsii na osnove statisticheskogo modelirovaniya protsessa rascheta vyborok [Product quality management based on statistical modeling of the sample calculation process]. *XIX Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Nauka i molodezh'»* [Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Ph.D. students and Young Scientists «Science and youth»]. Barnaul, 2022, vol. 1, part 1, pp. 53–54.

13. Grishkova D.Yu., Tel'nov N.A. Ispol'zovanie instrumentariyev i metodov berezhlivogo proizvodstva v gruzovoi i kommercheskoi rabote. Opyt vnedreniya v OAO «RZhD» i na drugikh vidakh transporta [The use of lean production tools and methods in cargo and commercial work. The experience of implementation in JSC «Russian Railways» and other types of transport]. *Sbornik trudov VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Vyzovy globalizatsii i razvitiya tsifrovogo obshchestva v usloviyakh novoi real'nosti»* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Challenges of globalization and development of digital society in a new reality»]. Moscow, 2023, pp. 59–66.

14. Nizhegorodtsev R.M. Obobshchennaya diagramma Isikavy kak instrument faktornogo analiza [Generalized Ishikawa diagram as a factor analysis tool]. *Drukerovskii vestnik* [Drucker's Bulletin], 2017, no. 6 (20), pp. 15–24.

15. Grishkova D.Yu., Teslenko I.O. Berezhlivoe proizvodstvo kak osnova povysheniya proizvoditel'nosti truda [Lean manufacturing as a basis for increasing labor productivity]. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proceedings of the Donetsk Institute of Railway Transport], 2018, no. 51, pp. 45–52.

16. Kuznetsov A.L., Kirichenko A.V., Shcherbakova-Slyusarenko V.N. Benchmarkingovy pokazateli v tekhnologicheskoy proektirovaniy konteynernykh terminalov [Benchmarking indicators in technological design of container terminals]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. Admirala S.O. Makarova* [Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov], 2018, vol. 10, no. 1, pp. 7–19.

17. Kuznetsov A.L., Kozlova E.Yu. Sravnenie razlichnykh metodik otsenki trebuemoi vmestimosti sklada pri tekhnologicheskoy proektirovaniy konteynernykh terminalov [Comparison of various methods for estimating the required storage capacity in the technological design of container terminals]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta* [Operation of marine transport], 2008, no. 4 (54), pp. 9–14.

18. Korol' R.G. Imitatsionnoe modelirovanie propusknoi sposobnosti avtomobil'nogo pogranychogo perekhoda «Kani-Kurgan (RF) – Kheikhe (KNR)» [Simulation modeling of the capacity of the automobile border crossing «Kani-Kurgan (RF) – Heihe (PRC)»]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)* [Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MARI)], 2023, no. 1 (72), pp. 42–49.

19. Dzhoiev A.Z. Innovatsii v sistemakh upravleniya konteynernymi terminalami [Innovations in container terminal management systems]. *Sistemnyi analiz i logistika* [System analysis and logistics], 2013, no. 10, pp. 4–8.

20. Nurgaliev E.R. Imitatsionnoe modelirovanie tekhniko-tekhnologicheskikh parametrov avtomobil'nykh perevozok v

logisticheskoi tsepi [Simulation modeling of technical and technological parameters of road transport in the logistics chain]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2016, vol. 4, no. 5-3 (25-3), pp. 320–325.

**Информация об авторах**

*Гришкова Диана Юрьевна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики, коммерческой работы и подвижного состава, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск; e-mail: raigas@inbox.ru.

**Information about the authors**

*Diana Yu. Grishkova*, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock, Siberian Transport University, Novosibirsk; e-mail: raigas@inbox.ru.

## Неравноупругость железнодорожного пути и ее учет в математических моделях подвижного состава ОАО «Российские железные дороги»

В.А. Нехаев<sup>1</sup>✉, Е.Г. Леоненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, Российская Федерация

✉nehaevva@rambler.ru

### Резюме

Проблема взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути является важнейшей для железнодорожного транспорта. До настоящего времени она не решена в полном объеме, видимо, из-за сложности соответствующих математических моделей. Для решения данной проблемы следует менять парадигму математических моделей, переходя от обыкновенных дифференциальных уравнений на обыкновенные дифференциальные уравнения со случайными коэффициентами. Большинство исследователей в расчетах динамики взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава вертикальную жесткость пути принимают постоянной величиной в продольном направлении, а это не так. Даже в случае «бархатного» пути существует его неравноупругость, жесткости над шпалой и в междушпальном ящике, по данным профессоров М.Ф. Вериги и А.Я. Когана, отличаются, такой вывод сделан на основании экспериментальных данных Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Также необходимо учитывать, что жесткости по левым и правым колесам не идентичны. В новой парадигме обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными, случайными или параметрическими коэффициентами меняются понятия резонанса и устойчивости. Из приведенных расчетов видно, что при введении показателя силы тяжести и учете параметров подвижного состава, а также жесткости пути под левым и правым колесами, величины подпрыгивания и боковой качки с увеличением скорости значительно возрастают, что может привести к разгрузке колеса и, как следствие, к его вползанию на головку рельса.

### Ключевые слова

железнодорожный путь, подвижной состав, неравноупругость пути, жесткость пути, подпрыгивание колесной пары, боковая качка, математическая модель

### Для цитирования

Нехаев В.А. Неравноупругость железнодорожного пути и его учет в математических моделях подвижного состава Российских железных дорог / В.А. Нехаев, Е.Г. Леоненко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 97–111. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).97-111.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 23.06.2023 г.; поступила после рецензирования: 05.09.2023 г.; принята к публикации: 07.09.2023 г.

## The non-uniform elasticity of the railway track and its considering in mathematical models of rolling stock of JSC «Russian Railways»

V.A. Nekhaev<sup>1</sup>✉, E.G. Leonenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Krasnoyarsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉nehaevva@rambler.ru

### Abstract

The problem of interaction between rolling stock and railway track is relevant and important for railway transport. To date, it has not been fully solved, apparently due to the complexity of the corresponding mathematical models. To solve this problem, it is necessary to change the paradigm of mathematical models, moving from ordinary differential equations to ordinary differential equations with random coefficients. Most researchers in the calculations of the dynamics of the interaction between the railway track and rolling stock, the vertical rigidity of the track is assumed to be a constant value in the longitudinal direction, which is not true. Even in the case of a «velvet» track, its non-uniform elasticity exists, the stiffness above the sleeper and in the intersleeper box, according to professors M.F. Verigo and A.Ya. Kogan, differ on the basis of experimental data from All-Union Scientific and Research Institute of Railway Transport. It is also necessary to take into account that the stiffnesses of the left and right wheels are not identical. In the new paradigm of ordinary differential equations with variable, random or parametric coefficients, the concepts of resonance and stability are changing. From the above calculations, it can be seen that with taking into account gravity in the calculations and the parameters of the rolling stock, as well as the stiffness of the track under the left and

right wheels, the values of bouncing and lateral pitching increase significantly with increasing speed, which can lead to unloading of the wheel, and as a consequence - to its crawling onto the rail head.

### Keywords

railway track, rolling stock, track non-uniform elasticity, track stiffness, wheelset bouncing, lateral pitching, mathematical model

### For citation

Nekhaev V.A., Leonenko E.G. Neravnouprugost' zheleznodorozhnogo puti i ego uchet v matematicheskikh modelyakh podvizhnogo sostava OAO «Rossiiskie zheleznye dorogi» [The non-uniform elasticity of the railway track and its considering in mathematical models of rolling stock of JSC «Russian Railways»]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 97–111. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).97-111.

### Article Info

Received: June 23, 2023; Revised: September 5, 2023; Accepted: September 7, 2023.

### Введение

Современный железнодорожный путь – это чрезвычайно сложная конструкция. Для ее введения в математические модели учеными, занимающимися задачами железнодорожного транспорта, были разработаны три математические модели железнодорожного пути. Первая – это абсолютно жесткий путь, характеризуемый только одной геометрической неровностью. Ее апологетом был профессор Российского университета транспорта (МИИТ) В.Б. Медель, утверждавший, что жесткость железнодорожного пути значительно выше жесткости буксового подвешивания, поэтому жесткостью пути можно и нужно пренебречь [1, 2]. Второй моделью была дискретная безынерционная, учитывающая только силы упругости и трения, а также геометрическую неровность. Третья модель называется дискретной инерционной, следовательно, относительно второй модели она дополнена «приведенной» массой пути. Действительно, каждый из нас, стоявший недалеко от железнодорожного пути в момент прохождения поезда, ощущал колебания земляного полотна под ногами. По этой причине и была введена соответствующая масса, определить которую можно только экспериментальными методами. Последняя континуальная модель с различными основаниями по Фойгту, Винклеру и т.п. себя, вообще говоря, не оправдала по причине сильной демпфированности системы и больших баз тележек, с одной стороны, а с другой – работники путевого хозяйства строят еще более сложные расчетные схемы пути, но в качестве возмущающего фактора принимают просто силу.

Сотрудники Днепровского национально-го университета железнодорожного транспорта (ДИИТ) и профессор В.П. Ткаченко из Луган-

ского державного университета доказали, что дискретная инерционная модель железнодорожного пути вполне пригодна для исследований взаимодействия подвижного состава и пути, так как ошибка не превышает 5–7 %.

Целью данной работы является введение в рассмотрение железнодорожниками продольной неравноупругости пути. Другими словами, мы должны сменить парадигму с обыкновенных дифференциальных уравнений на дифференциальные уравнения с переменными (периодическими) коэффициентами. В результате изменяются такие понятия, как резонанс и влияние на него вязкого трения. В старой парадигме под резонансом понималось совпадение какой-либо собственной частоты с частотой вынуждающей силы.

В новой парадигме различают простые и комбинационные резонансы суммарного или разностного типа. Более того, наличие диссипативных сил вязкого трения в старой парадигме всегда ограничивало резонансную амплитуду. В новой парадигме существование диссипативных сил не гарантирует ухода системы в бесконечность, а лишь создает пороговое значение для коэффициента параметрического возбуждения. Грубо говоря, поведение обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными (периодическими) коэффициентами принципиально отличается от поведения аналогичных уравнений с постоянными коэффициентами. Вообще говоря, продольная неравноупругость должна нормироваться, как это сделано железнодорожниками в случае геометрических неровностей на поверхности катания рельсов. С другой стороны, наука требует совершенствования вопроса взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути.

### Численное доказательство необходимости учета продольной нелинейности железнодорожного пути

Итак, откажемся от используемого практически всеми железнодорожниками допущения о постоянстве вертикальной жесткости пути и рассмотрим движение колесной пары экипажа по нелинейному пути, описываемое уравнениями:

$$\begin{cases} m\ddot{q} + (\beta_6 + \beta_n)\dot{q} + \{c_6 + c_0[1 - 2\mu \cos(2\Omega t)]\}q; \\ f(t) \approx \frac{P_{ст}}{mk_0^2} [1 + 2\mu \cos(2\Omega t)]. \end{cases} \quad (1)$$

Первое уравнение системы (1) описывает относительное движение колесной пары в движущейся системе координат с постоянной скоростью, второе уравнение представляет собой переносное движение колесной пары. Из курса теоретической механики и физики известно, что абсолютное движение твердого тела складывается из переносного и относительного движений.

Продифференцируем так называемый статический прогиб железнодорожного пути дважды по времени  $t$  и после подстановки результатов в первое уравнение системы (1) и несложных преобразований получим дифференциальное уравнение, которое в дальнейшем будем численно интегрировать:

$$\begin{aligned} \ddot{q} + 2n\dot{q} + k_0^2(1 + 2\mu \cos 2\Omega t)q = \\ = 8\mu\Omega^2 \frac{P_{ст}}{mk_0^2} \left( \mu \cos \Omega t + \frac{\delta}{\lambda} \sin 2\Omega t \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $2n = (\beta_6 + \beta_n) / m$  – коэффициент демпфиро-

вания колесной пары,  $k_0^2 = (c_6 + c_0) / m$  – квадрат собственной частоты консервативной системы (колесной пары),  $\lambda = \Omega / k_0$  – расстройка системы по частоте (если она равна единице, то исследуемая система находится в области главного параметрического резонанса).

Интегрирование осуществлялось численным методом. В результате получено, что в случае попадания в область главного параметрического резонанса, когда диссипативные силы меньше критического значения коэффициента параметрического возмущения, т.е.  $\mu \geq \mu_{кр}$ , то в системе развивается параметрический резонанс, причем частота параметрического возмущения  $\Omega$  близка к собственной частоте подпрыгивания колесной пары и наличие вязких диссипативных сил не способно ограничить резонансную амплитуду. Расчетами установлено, что параметрический резонанс колесной пары подвижного состава возникает при коэффициенте параметрического возбуждения более 0,3 (рис. 1). В предыдущей парадигме математических моделей такое явление невозможно. Следовательно, учет продольной нелинейности железнодорожного пути обязателен в расчетных схемах подвижного состава.

### Расчет движения подвижного состава по равноупругому пути

Для разъяснения нелинейности пути возьмем простейшую расчетную схему – колесную пару, на которую действуют сила, приходящаяся со стороны экипажа, сила тяжести самой колесной пары, силы упругости пути

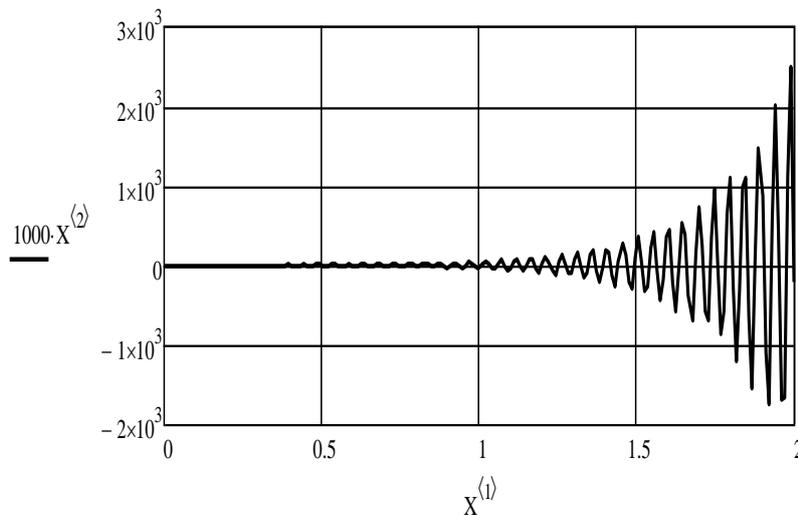


Рис. 1. Параметрический резонанс колесной пары экипажа возникает при  $\mu > 0,3$   
 Fig. 1. Parametric resonance of a rolling stock wheelset occurs at  $\mu > 0,3$

и буксового подвешивания. Уравнение движения такой простой расчетной схемы мы составим с помощью второго уравнения Ньютона, выбрав инерциальную неподвижную систему координат:

$$m\ddot{z} = P + mg - (c_6 + c_n)z - (\beta_6 + \beta_n)\dot{z}, \quad (2)$$

здесь  $m$  – масса колесной пары;  $P$  – вес экипажа, приходящийся на одну колесную пару;  $c_6, c_n$  – жесткость буксового подвешивания и жесткость железнодорожного пути (в данный момент совсем неважно постоянная эта величина или нет);  $\beta_6, \beta_n$  – коэффициенты вязкого трения в буксовом подвешивании и в пути;  $z$  – абсолютная координата подпрыгивания колесной пары. Перепишем (2) в более привычном виде:

$$m\ddot{z} + (c_6 + c_n)z - (\beta_6 + \beta_n)\dot{z} = P_{ст}.$$

Теперь положим, что жесткость пути постоянна по протяженности,  $c_n = \text{const}$ . Тогда избавимся от постоянной правой части заменой переменной:

$$z = f + q. \quad (3)$$

Взяв от (3) производную по времени, считая переменную  $f$  константой, получим:

$$m\ddot{q} + (c_6 + c_n)(q + f) + (\beta_6 + \beta_n)\dot{q} = P_{ст}, \quad (4)$$

или

$$\begin{cases} \ddot{q} + 2n\dot{q} + k_0^2 q; \\ (c_6 + c_n)f = P_{ст}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $2n$  – коэффициент демпфирования системы;

$k_0 = \sqrt{\frac{c_6 + c_0}{m}}$  – собственная частота консервативной системы. Из второго уравнения системы (5) находим так называемый статический прогиб железнодорожного пути:

$$f_{ст} = \frac{P_{ст}}{mk_0^2}.$$

Первое дифференциальное уравнение системы (5) описывает собственные колебания автономной диссипативной механической системы. Как известно из теории колебаний, они с течением времени затухают, т.е. исчезают. По окончании переходного процесса колесная пара будет катиться по железнодорожному пути спокойно, без колебаний. Это чрезвычайно важное обстоятельство – равноупругий железнодорожный путь не является источником возмущающего воздействия на экипаж.

Применяя алгоритм Лагранжа второго рода и определив потенциальную и кинетическую энергию, а также функцию рассеивания, получим:

$$\ddot{q} + 2n\dot{q} + k_0^2 q = 0. \quad (6)$$

Данное уравнение описывает свободные затухающие колебания. Разумеется, здесь исследовать абсолютно нечего. Так как составляется характеристическое уравнение, вычисляются его корни и записывается общее решение однородного дифференциального уравнения (6).

Следовательно, оставаясь в старой парадигме обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, все расчетные параметры находятся достаточно легко, но при этом не учитываются особенности при движении по неравноупругому пути.

### Расчет движения подвижного состава по неравноупругому пути

Пусть жесткость железнодорожного пути будет равна (при условии, что движение вдоль пути осуществляется с постоянной скоростью)

$$c_n(t) = c_0 \left[ 1 - 2\mu \cos\left(2 \frac{\pi V}{3,6l} t\right) \right], \quad (7)$$

где  $c_0$  – средняя жесткость пути на рельсовом звене;  $\mu$  – коэффициент параметрического возбуждения (как показывают натурные эксперименты он находится в пределах 0–0,07);  $l$  – длина составляющей неравноупругости пути, например, междушпальное расстояние.

Подставим (7) в (4) и найдем:

$$m\ddot{q} + (\beta_6 + \beta_n)\dot{q} + \left( c_n + c_0 \left[ 1 - 2\mu \cos\left(2 \frac{\pi V}{3,6l} t\right) \right] \right) \cdot (q + f) = P_{ст}.$$

Полученное уравнение называется параметрическим, оно не обладает регулярными методами интегрирования, отсюда получим:

$$\begin{cases} m\ddot{q} + (\beta_6 + \beta_n)\dot{q} + \left\{ c_6 + c_0 \left[ 1 - 2\mu \cos\left(2 \frac{\pi V}{3,6l} t\right) \right] \right\} q = 0; \\ \left\{ c_6 + c_0 \left[ 1 - 2\mu \cos\left(2 \frac{\pi V}{3,6l} t\right) \right] \right\} f_{ст} = P_{ст}. \end{cases} \quad (8)$$

Последнее уравнение позволяет нам вычислить так называемый статический прогиб железнодорожного пути:

$$f = \frac{P_{ст}}{mk_0^2} \frac{2}{1 - 2\mu \frac{c_0}{c_6 + c_0} \cos\left(2 \frac{\pi V}{3,6l} t\right)}.$$

Упростим данное выражение полагая, что  $c_0 / (c_6 + c_0) \approx 1$ , тогда получим:

$$f = \frac{P_{\text{ст}}}{mk_0^2} \frac{2}{1 - 2\mu \cos(2\Omega t)}. \quad (9)$$

здесь  $\Omega = \pi V / (3,6l)$  – частота параметрического возбуждения, рад/сек.

Итак, в действительности так называемый статический прогиб железнодорожного пути является функцией времени. Второй член в (9) является безразмерным и, кроме того, его знаменатель достаточно близок к единице, следовательно, с помощью бинома Ньютона можно записать:

$$\frac{2}{1 - 2\mu \cos(2\Omega t)} = 1 + 2\mu \cos 2\Omega t + (2\mu \cos 2\Omega t)^2 + (2\mu \cos 2\Omega t)^3 \dots \quad (10)$$

Так как величина коэффициента параметрического возмущения мала, т.е. изменяется в пределах 0–0,1, то в правой части формулы (10) можно оставить только два первых члена, поэтому имеем:

$$\frac{2}{1 - 2\mu \cos(2\Omega t)} \approx 1 + 2\mu \cos 2\Omega t.$$

Следовательно, приближенно статический прогиб железнодорожного пути представим так:

$$f(t) = \frac{P_{\text{ст}}}{mk_0^2} [1 + 2\mu \cos(2\Omega t)]$$

Так как  $f(t)$  – функция времени, поправим систему дифференциальных уравнений (8) так:

$$\left\{ \begin{aligned} m\ddot{q} + (\beta_6 + \beta_n)\dot{q} + \left\{ c_6 + c_0 \left[ 1 - 2\mu \cos \left( 2 \frac{\pi V}{3,6l} t \right) \right] \right\} q &= \\ &= -mf - (\ddot{\beta} + \dot{\beta}) \dot{f}; \\ f(t) &= \frac{P_{\text{ст}}}{mk_0^2} [1 + 2\mu \cos(2\Omega t)]. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Таким образом, первое уравнение системы (11) описывает относительное движение колесной пары в движущейся системе координат, второе уравнение представляет собой переносное движение колесной пары. Из курса теоретической механики и физики известно, что абсолютное движение твердого тела складывается из переносного и относительного движений [3].

Продифференцируем так называемый статический прогиб железнодорожного пути дважды по времени  $t$  и после подстановки результатов в первое уравнение системы (11) и несложных преобразований получим дифференциальное уравнение, которое в дальнейшем будем численно интегрировать:

$$\ddot{q} + 2n\dot{q} + k_0^2(1 - 2\mu \cos 2\Omega t) = 8\mu\Omega^2 \frac{P_{\text{ст}}}{mk_0^2} \left( \mu \cos 2\Omega t + \frac{\delta}{\lambda} \sin 2\Omega t \right). \quad (12)$$

Приведем (12) к нормальной форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{Y}_1 = Y_2; \\ \dot{Y}_2 = 8\mu\lambda^2 \frac{P_{\text{ст}}}{mk_0^2} \left[ \mu \cos 2\Omega t + \frac{\delta}{\lambda} \sin 2\Omega t \right] - \\ - k_0^2(1 - 2\mu \cos 2\Omega t)Y_1 - 2nY_2. \end{cases}$$

Численное интегрирование последнего уравнения движения колесной пары экипажа по неравноупругому железнодорожному пути приведены на рис. 2–4.

Следует отметить, что подпрыгивает колесная пара довольно своеобразным образом. Если допустить равенство собственной частоты консервативной системы  $k_0$  частоте параметрического возбуждения  $\Omega$ , то достаточно быстро

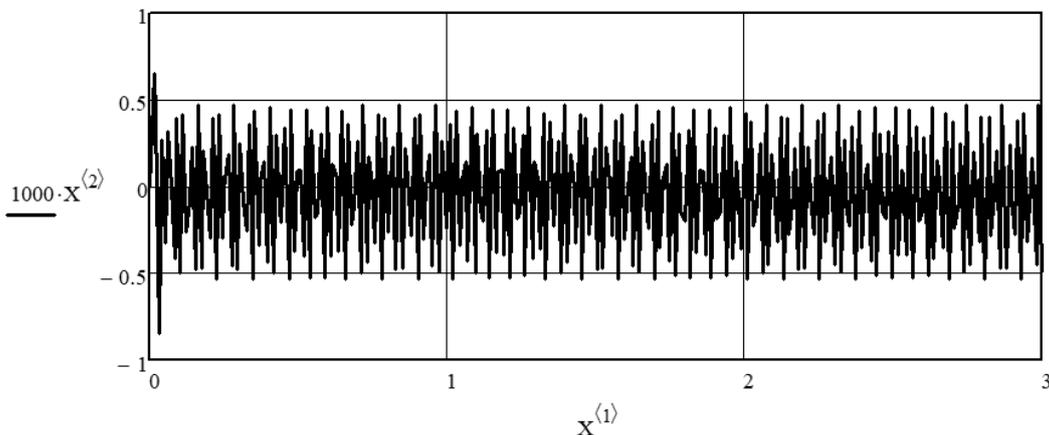
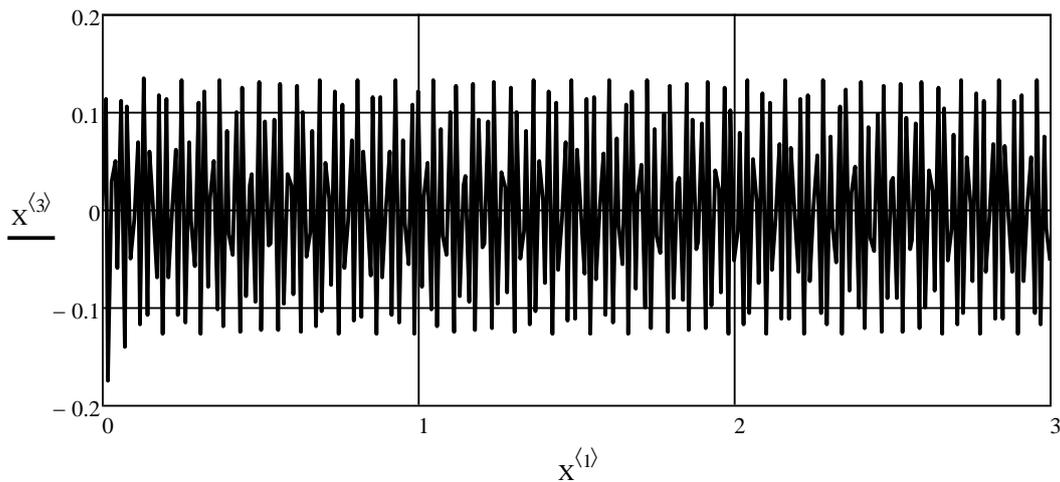
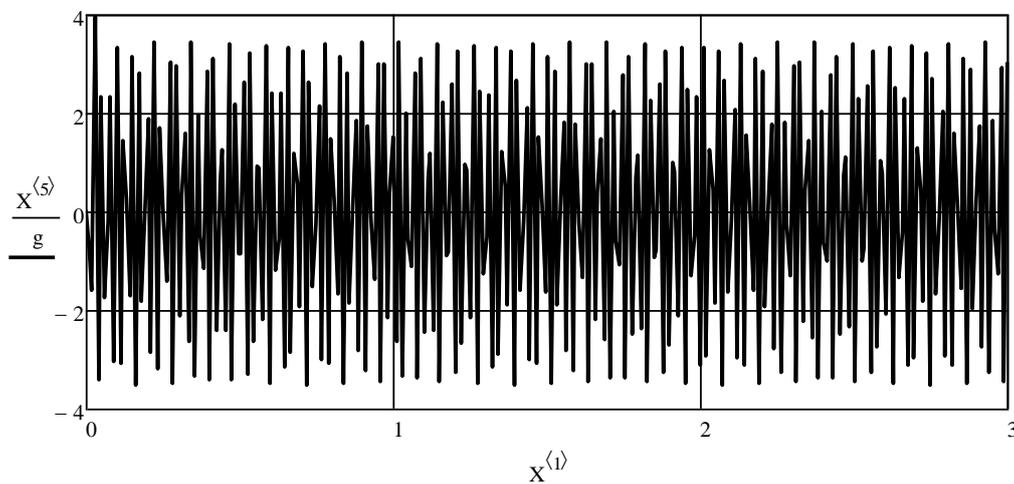


Рис. 2. Подпрыгивание колесной пары в относительном движении, мм  
Fig. 2. Wheelset bouncing during relative motion, mm



**Рис. 3.** Скорость подпрыгивания колесной пары в относительном движении, м/с  
**Fig. 3.** The speed of the wheelset bouncing in relative motion, m/s



**Рис. 4.** Ускорение подпрыгивания колесной пары в относительном движении, м/с<sup>2</sup>  
**Fig. 4.** Acceleration bouncing of the wheelset in relative motion, m/s<sup>2</sup>

система уходит в бесконечность. Ускорение подпрыгивания достигает порядка  $10g$ .

Наличие неравноупругости железнодорожного пути вынуждает нас вводить в расчет силы тяжести. Это позволит использовать известный алгоритм уравнений Лагранжа второго рода, в котором обобщенные координаты отсчитываются от положения статического равновесия системы. Однако в данном случае уравнения Лагранжа нужно написать в виде:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \Gamma}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial \Gamma}{\partial z} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}} + \frac{\partial \Pi}{\partial z} = Q_z; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \Gamma}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial \Gamma}{\partial \varphi} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = Q_\varphi. \end{cases} \quad (13)$$

В стандартном алгоритме уравнений Лагранжа второго рода правые части обычно рав-

ны нулю. В данном случае обобщенные силы  $Q_z$  и  $Q_\varphi$ , несомненно, отличны от нуля. Обобщенные силы определены с помощью принципа возможных перемещений.

Кинетическая энергия колесной пары, которую примем абсолютно твердым телом, имеющим шесть степеней свободы. Согласно системе уравнений (13) рассмотрено только подпрыгиванием колесной пары  $z$  и боковая качка  $\varphi$ . Для решения поставленной задачи число степеней свободы искусственным образом было уменьшено до двух, кинетическая энергия равна:

$$\Gamma = \frac{1}{2} m \dot{z}^2 + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2, \quad (14)$$

где  $m$  – масса колесной пары;  $z$  – подпрыгивание колесной пары;  $J$  – момент инерции колес-

ной пары;  $\varphi$  – обобщенная координата, характеризующая боковую качку колесной пары.

Потенциальная энергия равна:

$$\Pi = \frac{1}{2}(c_{\delta} - c_{n1}) \cdot (z - s\varphi)^2 + \frac{1}{2}(c_{\delta} - c_{n2}) \cdot (z + s\varphi)^2 - (P + mg)z.$$

где  $c_{\delta}$  – жесткость буксового подвешивания;  $c_{n1}$ ,  $c_{n2}$  – жесткость железнодорожного пути под левым и правым колесом колесной пары.

При условии размещения упругих и диссипативных элементов в одних и тех же местах, функция рассеивания почти идентична потенциальной функции. Следовательно, имеем:

$$\Phi = \frac{1}{2}(\beta_{\delta} + \beta_n) \cdot (z - s\varphi)^2.$$

Взяв соответствующие частные и прямые производные от кинетической, потенциальной энергии и функции рассеивания и подставляя результаты в уравнения Лагранжа второго рода, находим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m\ddot{z} + 2(\beta_{\delta} + \beta_n)\dot{z} + (2c_{\delta} + c_{n1} + c_{n2})z + (c_{n1} - c_{n2})s\varphi &= P + mg; \\ J\ddot{\varphi} + 2(\beta_{\delta} + \beta_n)s^2\dot{\varphi} + (2c_{\delta} + c_{n1} + c_{n2})s^2\varphi + (c_{n2} - c_{n1})sz &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Система дифференциальных уравнений не является однородной или автономной, так как содержит правую часть, представляющую собой силу статического давления колесной пары на путь. Кроме того, анализ выведенной системы дифференциальных уравнений (15) указывает на тот факт, что разность вертикальной жесткости пути под левым и правым колесами колесной пары экипажа влияет как на подпрыгивание, так и на боковую качку колесной пары.

Если же допустить, что путь является равноупругим, то  $c_{n1} = c_{n2} = c_0$ , система дифференциальных уравнений (15) примет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{z} + 2(\beta_{\delta} + \beta_n)\dot{z} + 2(c_{\delta} + c_0)z = (P + mg); \\ J\ddot{\varphi} + 2(\beta_{\delta} + \beta_n)s^2\dot{\varphi} + 2(c_{\delta} + c_0)s^2\varphi = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Эта система дифференциальных уравнений, во-первых, не является автономной или однородной, так как содержит правую часть отличную от нуля, во-вторых, если отбросить последние слагаемые, характеризующие наличие продольной неравноупругости пути, то получается, что системы дифференциальных уравнений (14) и (15) абсолютно идентичны,

разумеется, этого следовало ожидать.

Примем, что  $z = f + q$ , где  $f$  – постоянная величина равная:

$$f = \frac{P + mg}{2(c_{\delta} + c_0)}.$$

Тогда имеем:

$$\begin{cases} m\ddot{q} + 2(\beta_{\delta} + \beta_n)\dot{q} + 2(c_{\delta} + c_0)q = 0; \\ J\ddot{\varphi} + 2(\beta_{\delta} + \beta_n)s^2\dot{\varphi} + 2(c_{\delta} + c_0)s^2\varphi = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Данная система обыкновенных дифференциальных уравнений уже является однородной и описывает свободные затухающие (из-за наличия сил вязкого трения) колебания. Более того, каждое из уравнений системы (16) может быть проинтегрировано отдельно, ибо они независимы друг от друга.

Приведем уравнение (16) к нормальной форме Коши, предварительно записав его в векторно-матричном виде:

$$A\vec{\xi} + B\dot{\vec{\xi}} + C\vec{\xi} = 0,$$

где  $B = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & J \end{pmatrix}$  – матрица инерционных коэффициентов;

$B = \begin{pmatrix} 2(\beta_{\delta} + \beta_n) & 0 \\ 0 & 2(\beta_{\delta} + \beta_n)s^2 \end{pmatrix}$  – матрица диссипативных коэффициентов;

$C = \begin{pmatrix} 2(c_{\delta} + c_n) & 0 \\ 0 & 2(c_{\delta} + c_0)s^2 \end{pmatrix}$  – матрица жест-

костных коэффициентов;  $\vec{\xi} = \begin{pmatrix} q \\ \varphi \end{pmatrix}$  – вектор обобщенных координат.

Для решения системы уравнений перейдем к нормальной форме Коши  $\chi := \sqrt{\text{polyroots}(\rho)}$ , по методу представленному в [4]:

$$\vec{y} = G\vec{\xi},$$

где  $G = \begin{pmatrix} 0 & E \\ -A^{-1}C & -A^{-1}B \end{pmatrix}$  – матрица Коши, а

иногда ее называют матрицей Хилла (которая уже обладает четвертым порядком);  $\vec{y} = \begin{pmatrix} \vec{\xi} \\ \vec{\xi} \end{pmatrix}$ .

Найдем корни системы дифференциальных уравнений, вычислив собственные векторы матрицы Хилла:

$$A = \begin{pmatrix} 0,95 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 23,7 & 0 \\ 0 & 13,797405 \end{pmatrix};$$

$$C = \begin{pmatrix} 5332,49516 & 0 \\ 0 & 3104,413375 \end{pmatrix}.$$

С помощью метода Д.К. Фаддеева определим значения коэффициентов характеристического полинома системы дифференциальных уравнений (16):

$$\rho = \begin{pmatrix} 174255466,25218 \\ -36657,286546 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Зная коэффициенты характеристического уравнения, можно с помощью соответствующей стандартной функции *polyroots(...)* вычислить его корни и тем самым оценить собственные частоты

$$\chi = \begin{pmatrix} 74,920977 \\ 176,193455 \end{pmatrix}.$$

Так, система является диссипативной. Находим комплексные корни характеристического уравнения:

$$\omega := \text{eigenvals}(G) = \begin{pmatrix} -12,473684 & +73,8753i \\ -12,473684 & -73,8753i \\ -50 & +168,95009i \\ -50 & -168,95009i \end{pmatrix}$$

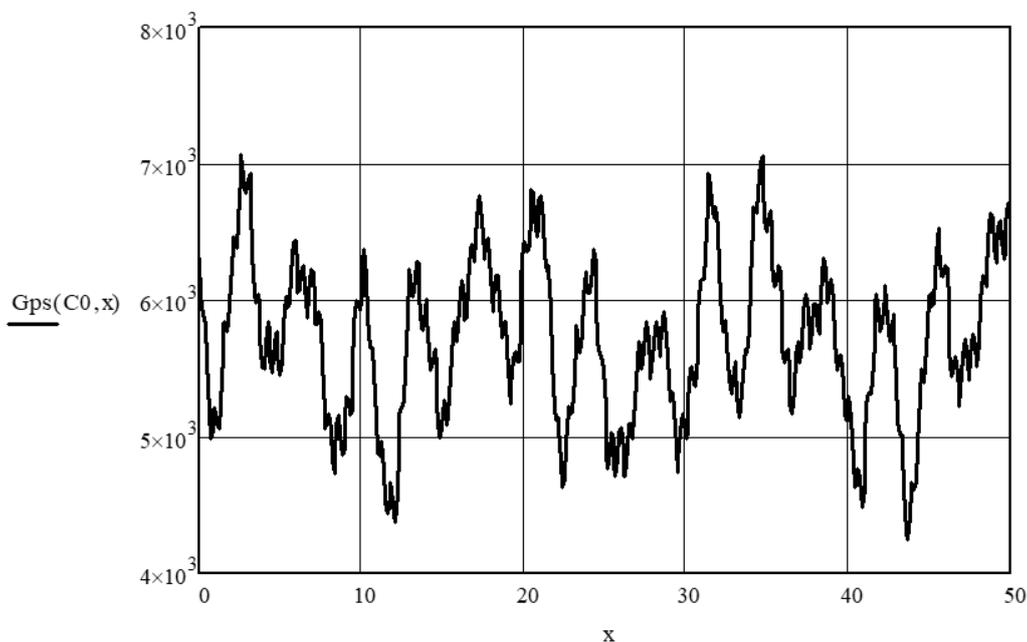
отметим, что собственная частота подпрыгивания колесной пары равна 73,8753 рад/сек, а боковая качка – 168,95 рад/сек. Коэффициенты относительного вязкого трения составляют 0,169 для подпрыгивания и 0,295 для боковой

качки колесной пары. Таким образом, можно полагать, что рассматриваемые колебания колесной пары экипажа демпфированы вполне нормально.

Произведем интегральную оценку жесткости железнодорожного пути под колесной парой подвижного состава (рис. 5).

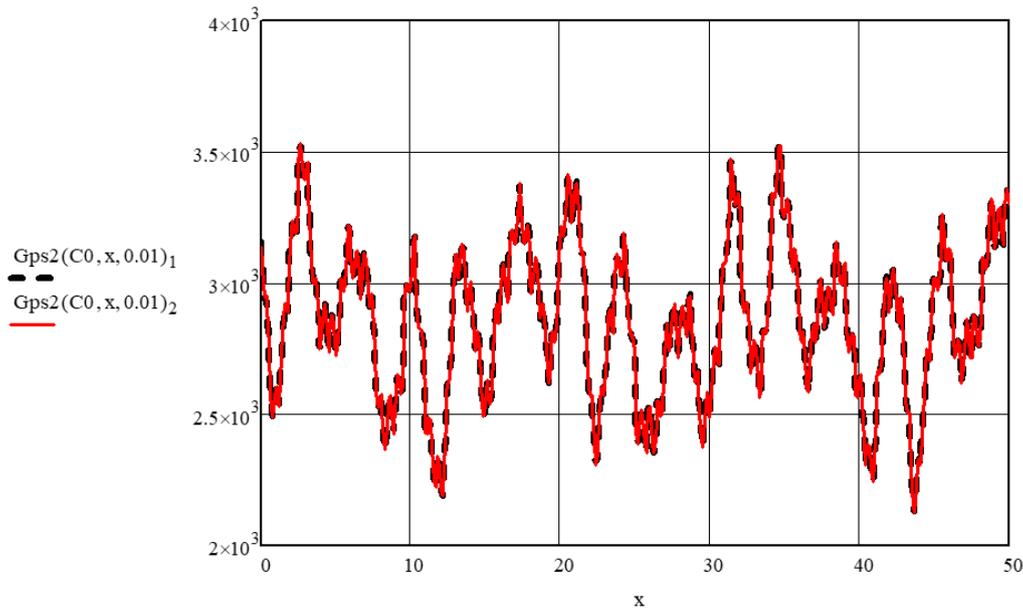
Неизвестно изменение жесткости железнодорожного пути под левым и правым колесами колесной пары экипажа, движущегося по неравноупругому пути в продольном направлении. За многие годы экспериментальных исследований вертикальной жесткости пути никто и не изучал отдельно результаты для левого и правого колес. Для определения жесткости под левым и правым колесом колесной пары введем новую переменную  $\varepsilon$ , которая будет характеризовать сдвиг кривых вертикальных жесткостей под колесами. На рис. 6 показано изменение вертикальных жесткостей некоторого железнодорожного пути под левым и правым колесами колесной пары.

Анализируя представленные данные на рис. 6 при  $\varepsilon = 0,01$ , можно сделать вывод, что вертикальные жесткости под левым и правым колесами колесной пары отличаются не очень сильно, и величина этого отличия будет зависеть от величины  $\varepsilon$ .



**Рис. 5.** Интегральная оценка жесткости железнодорожного пути под колесной парой подвижного состава, тс/м

**Fig. 5.** Integral estimation of railway track stiffness under a rolling stock wheelset, ts/m



**Рис. 6.** Жесткость пути под левым и правым колесами колесной пары, тс/м

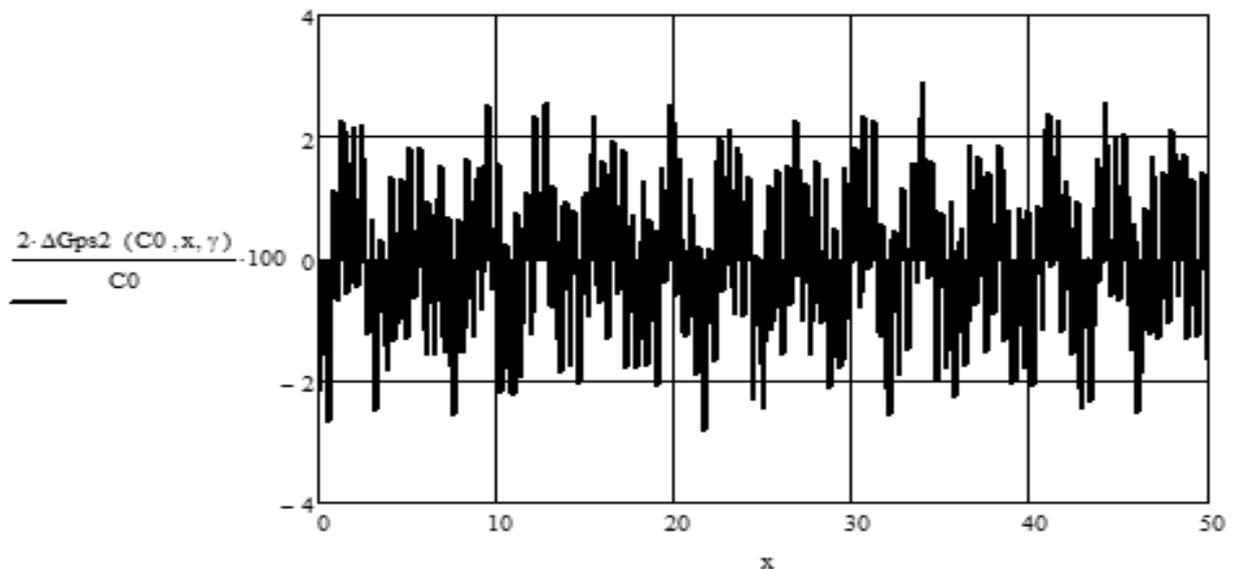
**Fig. 6.** Rigidity of the railway track under the left and right wheels of the wheelset, ts/m

На рис. 7 представлена оценка приращеня жесткости под левым и правым колесами, разница жесткостей под колесами колесной пары отличается всего на 4 %, что может оказать существенное значение при определении динамических качеств как железнодорожного пути, так и подвижного состава.

Ниже приведены результаты численного интегрирования уравнения движения колесной пары по неравноупругому пути (рис. 8–11). Расчеты выполнялись с использованием чис-

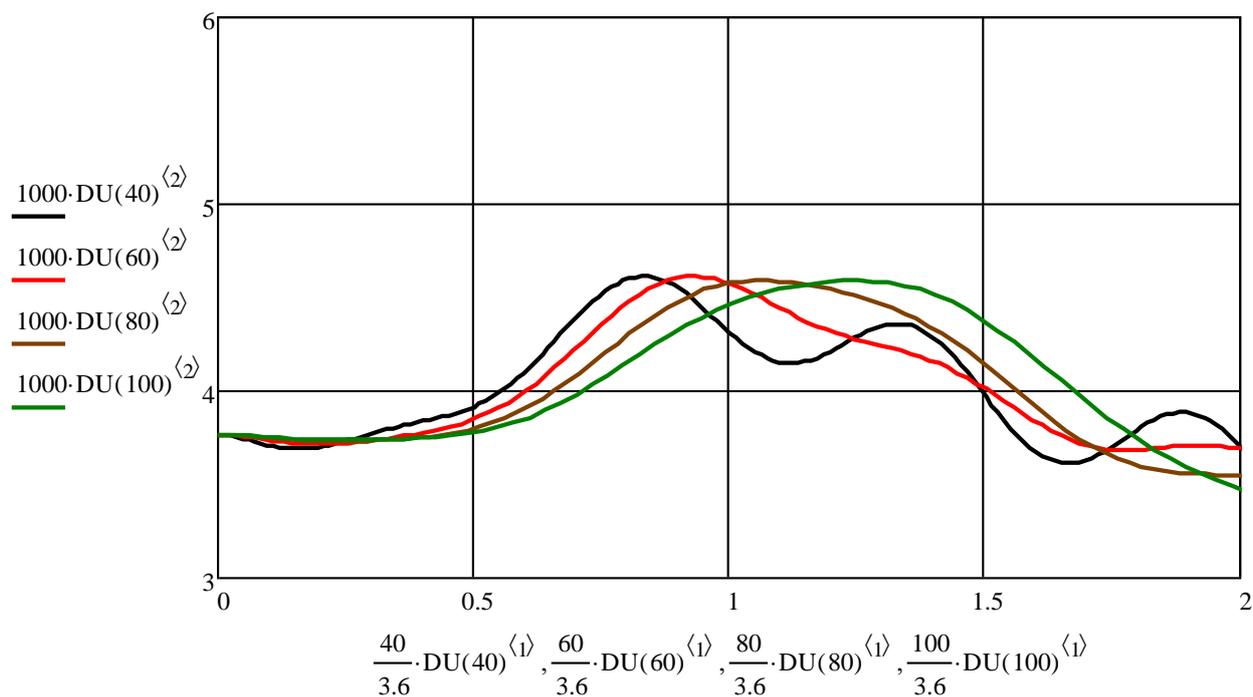
ленного метода Рунге – Кутты с постоянным шагом интегрирования для  $\varepsilon = 0,04$ . Расчеты произведены для скоростей движения 40, 60, 80 и 100 км/ч.

На рис. 12 приведена интегральная оценка динамической добавки давления колесной пары экипажа на путь для Сибирского региона. Из этого рисунка следует, что динамическая добавка давления не превышает 4 тс и с увеличением скорости движения возрастает.

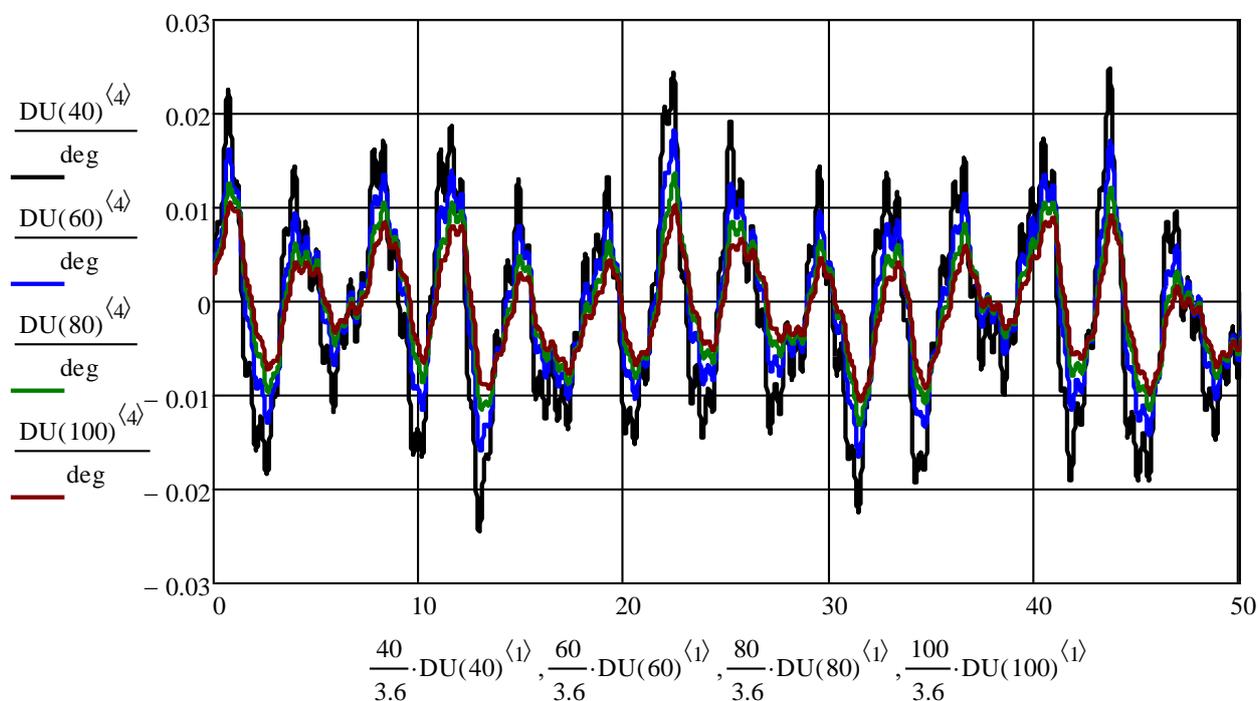


**Рис. 7.** Оценка приращеня жесткости пути к средней жесткости одной нити пути, %

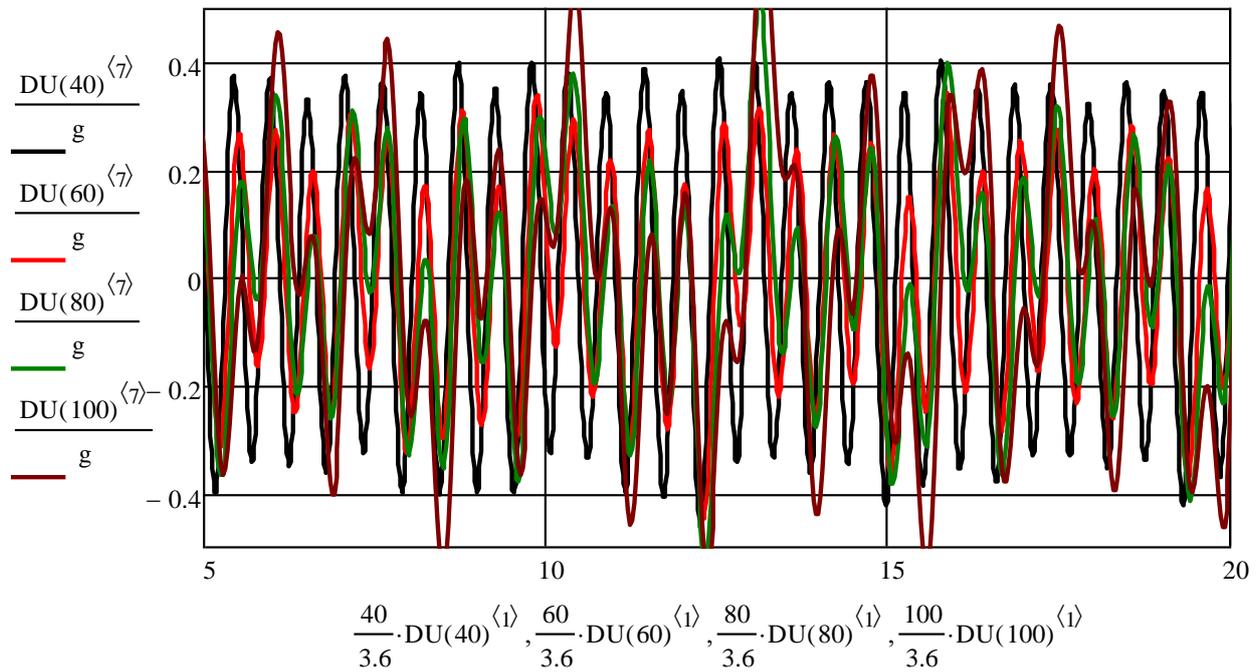
**Fig. 7.** Estimation of the increment of the stiffness of the track to the average stiffness of one thread of the track, %



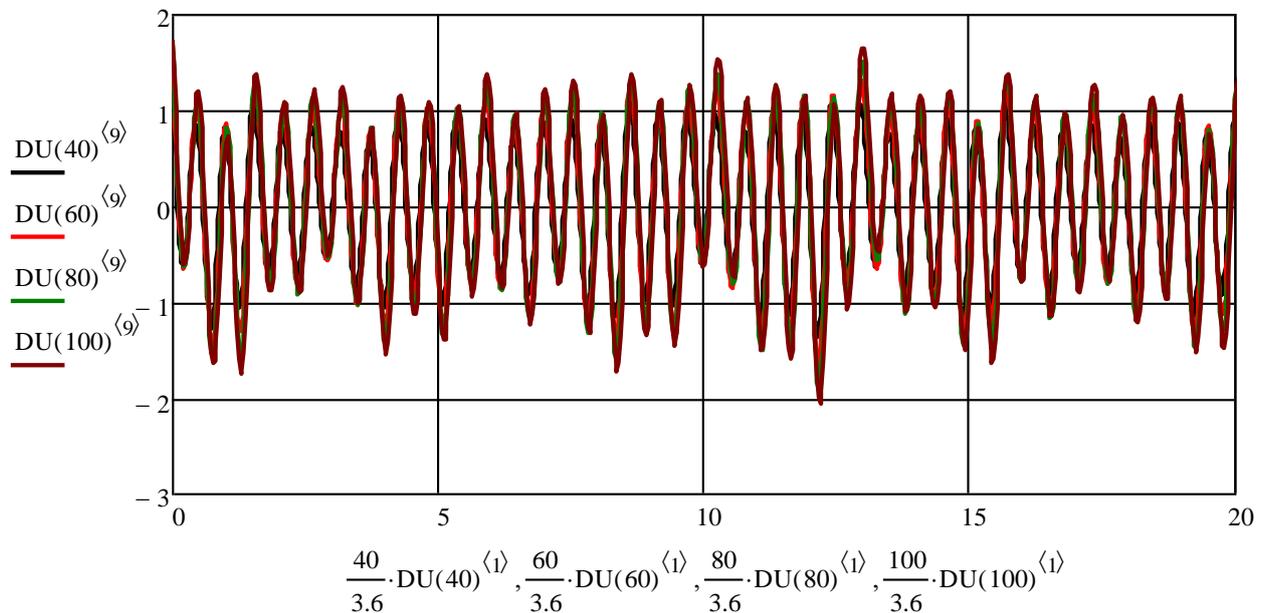
**Рис. 8.** Подпрыгивание колесной пары при движении по неравноупругому пути в Сибирском регионе, мм  
**Fig. 8.** Bouncing of the wheelset when moving along the non-uniformly elastic track in the Siberian region, mm



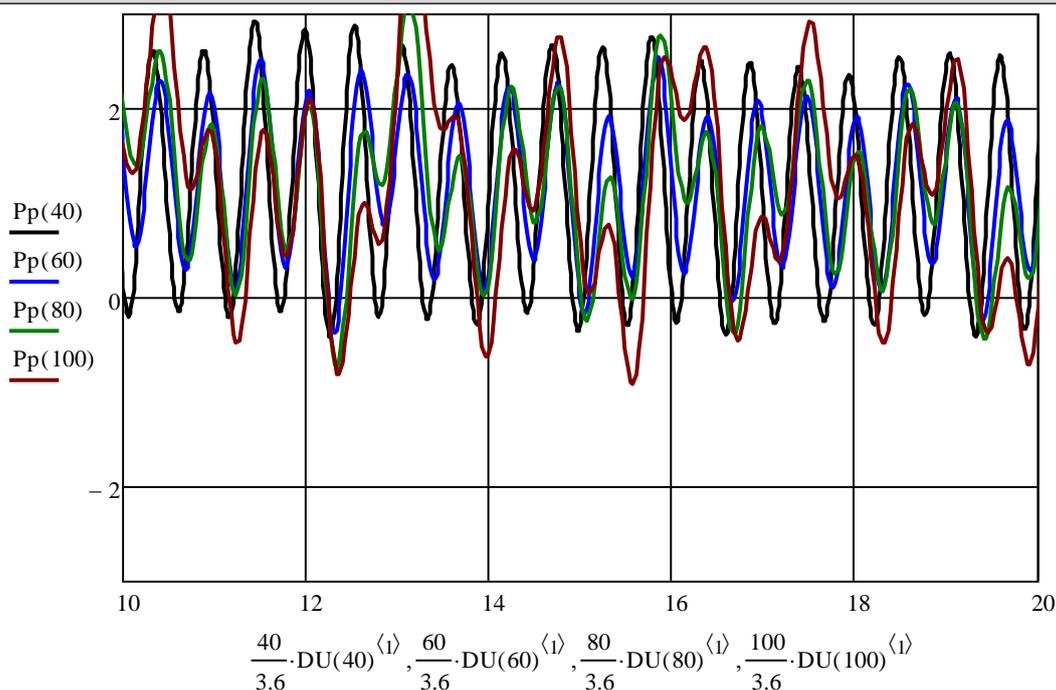
**Рис. 9.** Боковая качка колесной пары экипажа при движении по неравноупругому пути в Сибирском регионе  
**Fig. 9.** Lateral rolling of a rolling stock wheelset when moving along a non-uniformly elastic track in the Siberian region



**Рис. 10.** Ускорение подпрыгивания колесной пары экипажа при движении по неравноупругому пути в Сибирском регионе, в долях  $g$   
**Fig. 10.** Acceleration of the bouncing of a rolling stock wheelset when moving along an unevenly elastic track in the Siberian region, in fractions of  $g$



**Рис. 11.** Ускорение боковой качки колесной пары экипажа,  $\text{rad/s}^2$   
**Fig. 11.** Acceleration of the lateral pitching of the wheelset of the crew,  $\text{rad/s}^2$



**Рис. 12.** Интегральная оценка динамической добавки давления колесной пары экипажа на железнодорожный путь, тс

**Fig. 12.** Integral estimation of the dynamic component of a rolling stock wheelset pressure upon a railway track, ts

В завершении нашего исследования остановимся на определении областей динамической неустойчивости, что вполне естественно для параметрических систем. Этих областей множество [4–9], но счетное, при этом важное практическое значение имеют только главные области параметрического резонанса [4]. Для нахождения главной зоны динамической неустойчивости подпрыгивания колесной пары экипажа имеем приближенное, однако явное выражение для скорости движения поезда:

$$V_{1,2} = \frac{3,6l_{\text{шп}}k_0}{\pi} \left[ 1 - 2\delta \pm \sqrt{\mu^2 - 4\delta^2(1 - \delta^2)} \right],$$

здесь  $k_0$  – собственная частота подпрыгивания колесной пары железнодорожного экипажа;  $n = (\beta_6 + \beta_n) / 2m$  – коэффициент демпфирования колебаний подпрыгивания колесной пары;  $\delta = n / k_0$  – относительный коэффициент вязкого трения буксового подвешивания и пути;  $\mu$  – коэффициент параметрического возбуждения (или коэффициент изменения жесткости пути под шпалой и в междушпальном пролете, по данным профессоров Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта М.Ф. Вериго и А.Я. Когана они отличаются приблизительно на 30 % [10], а в пересчете на коэффициент усиления  $\mu$  имеем

около 0,13, в опытах же была зарегистрирована порядка 0,1);  $l_{\text{шп}} = 0,543$  м – междушпальное расстояние для эпюры шпал 1 840 шт. на 1 км.

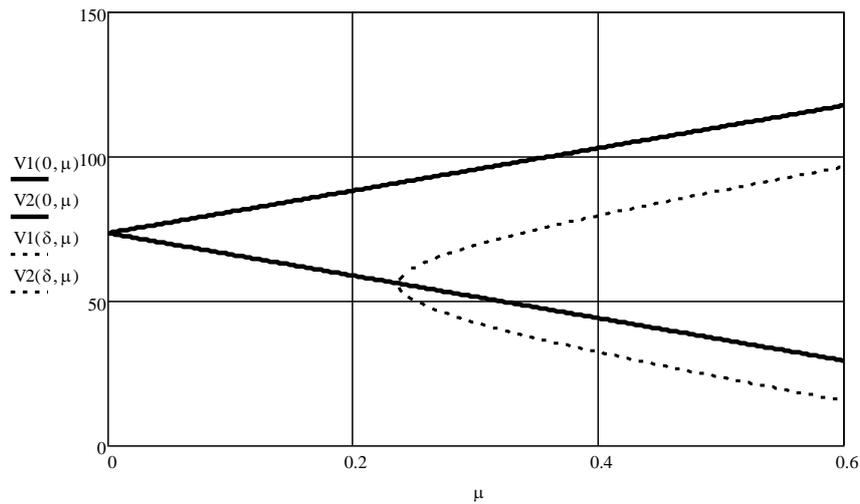
На рис. 13 и 14 показаны зоны динамической неустойчивости колебаний подпрыгивания и боковой качки колесной пары экипажа (сплошные линии – для консервативного случая, а пунктирные – для диссипативного случая).

## Заключение

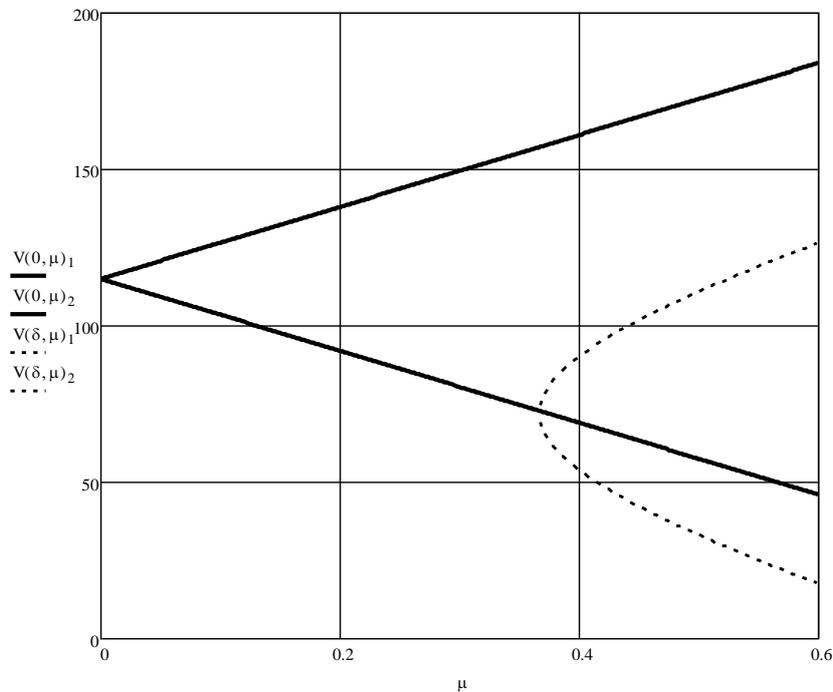
Приведенные формулы получены при учете в спектральной плотности лишь одной скрытой периодичности, имеющей длину междушпального промежутка. Из них следуют следующие утверждения:

1. Области динамической неустойчивости для подпрыгивания колесной пары и боковой качки накладываются на зону эксплуатационных скоростей современных поездов.

2. Наличие вязких диссипативных сил в системе «экипаж – железнодорожный путь» не может полностью исключить параметрические колебания подвижного состава, а создает лишь пороговые энергетические условия 0,236 и 0,368, превышение которых приводит к бесконечному росту амплитуд колебаний. Другими словами, если коэффициент параметрического усиления  $\mu$  будет больше указанных значений,



**Рис. 13.** Область параметрического резонанса подпрыгивания колесной пары экипажа, км/ч  
**Fig. 13.** The range of parametric resonance of the vehicle wheelset bouncing, km/h



**Рис. 14.** Область параметрического резонанса боковой качки колесной пары экипажа, км/ч  
**Fig. 14.** The range of parametric resonance of the lateral pitching of the vehicle wheelset, km/h

то амплитуды колебаний уйдут в бесконечность, т.е. система разрушится.

3. Исследованы зоны простых параметрических резонансов, развивающихся в районе критических частот, совпадающих с собственными частотами консервативной механической системы. Следует подчеркнуть, что изменяется само понятие резонанса, подразумевающее в классической трактовке совпадение собственных частот системы с какой-либо частотой возмущающих сил.

4. Из теории параметрических систем известно, что в диссипативных случаях силы вязкого трения могут играть отрицательную роль, расширяя с ростом трения области комбинационных резонансов многостепенных моделей.

5. Поставленная в работе задача существенно образом усложнится, если увеличить число степеней свободы железнодорожного экипажа и принять во внимание, что жесткость железнодорожного пути является случайной

величиной. Но развиваться в этом направлении транспортная механика будет вынуждена.

Первые исследования теоретические и натурные неравноупругости железнодорожного пути в зоне стыка выполнил в начале 60-х гг. прошлого века заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор, бывший заведующий кафедрой взаимодействия подвижного состава и пути и динамики локомотивов Омского института инженеров железнодорожного транспорта М.П. Пахомов [10, 11]. График изменения жесткости пути, полученный им, в указанном районе вошел практически во все учебники, посвященные динамике локомотивов и вагонов [12]. В то время еще физически не существовало знаменитого трактата членкорреспондента АН СССР В.В. Болотина [5] о динамической устойчивости упругих систем, в котором разъяснен вопрос о важности пара-

метрических колебаний в физических системах. Далее сотрудники ДИИТ под руководством доктора технических наук, профессора М.А. Фришмана [13–15] доказали экспериментально неравноупругость железнодорожного пути по его протяженности. Некоторые теоретические результаты были найдены сотрудниками МИИТ, кандидатом технических наук, профессором Г.П. Бурчаком и доктором технических наук, профессором Н.А. Панькиным [16–18]. Сложность данного вопроса состоит в том, что параметрические системы не обладают регулярными методами их интегрирования, и их точные решения никому не известны, а, кроме того, ученые-железнодорожники в основной своей массе являются так называемыми технарями, получившими высшее образование в технических вузах, в которых изучались лишь обыкновенные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами.

### Список литературы

1. Медель В.Б. Взаимодействие электровоза и пути. М. : Трансжелдориздат, 1956. 335 с.
2. Медель В.Б. Подвижной состав электрических железных дорог. Конструкция и динамика. М. : Транспорт, 1974. 232 с.
3. Кильчевский Н.А. Курс теоретической механики. Т. 2. Динамика системы, аналитическая механика, элементы теории потенциала, механика сплошной среды, специальной и общей теории относительности. М. : Наука, 1977. 543 с.
4. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т. 1: колебания линейных систем. М. : Машиностроение, 1978. 352 с.
5. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. М. : ГИТТЛ, 1956. 600 с.
6. Шмидт Г. Параметрические колебания. М. : Мир, 1978. 336 с.
7. Каннингхэм У.Дж. Введение в теорию нелинейных систем. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1962. 456 с.
8. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью // Математический сборник. 1960. Т. 51. № 1. С. 99–128.
9. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М. : Транспорт, 1986. 558 с.
10. Пахомов М.П., Нехаев В.А. К вопросу о параметрических колебаниях подвижного состава // Вопросы улучшения тяговых, энергетических и эксплуатационных свойств электровозов : сб. ст. Свердловск, 1978. № 59. С. 91–96.
11. Пахомов М.П., Галиев И.И., Нехаев В.А. Математическая модель колебаний тележки локомотива при движении по неравноупругому вдоль рельсового звена пути // Взаимодействие подвижного состава и пути и динамика локомотивов дорог Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера : межвуз. тем. сб. науч. тр. Омск, 1981. С. 9–15.
12. Механическая часть тягового подвижного состава / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др. М. : Транспорт, 1992. 440 с.
13. Фришман М.А., Леванков И.С. Исследование особенностей изменения вертикальной жесткости пути по его длине // Исследование взаимодействия пути и подвижного состава : мезвуз. сб. науч. тр. Днепропетровск, 1972. № 138. С. 48–57.
14. Фришман М.А., Леванков И.С. Об особенностях изменения вертикальной жесткости вдоль пути с тяжелым типом верхнего строения // Науч. тр. ДИИТа. 1973. № 142. С. 3–10.
15. Фришман М.А., Липовский Р.С., Данович В.Д. Экспериментальное определение частотных характеристик рельсошпальной решетки // Исследование взаимодействия пути и подвижного состава : мезвуз. сб. науч. тр. Днепропетровск, 1978. № 198/20. С. 3–11.
16. Бурчак Г.П. Колебания неподрессоренной массы на неравноупругом пути с неровностью // Тр. Акад. коммун. хоз-ва им. К.Д. Панфилова. 1980. Вып. 175. С. 84–98.
17. Панькин Н.А., Стесин И.М., Ценов В.П. Колебательные движения экипажей при параметрическом возмущении // Вестник ВНИИЖТ. 1978. № 1. С. 27–30.
18. Панькин Н.А., Стесин И.М., Бельняк Ю.Г. Вертикальные колебания экипажа, возникающие при движении по неравноупругому пути // Тр. МИИТ. Прикладная математика и задачи железнодорожного транспорта : межвуз. сб. М., 1979. № 640. С. 24–32.

### References

1. Medel' V.B. Vzaimodeistvie elektrovoza i puti [Interaction of an electric locomotive and a track]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1956. 335 p.
2. Medel' V.B. Podvizhnoi sostav elektricheskikh zheleznikh dorog. Konstruktsiya i dinamika [Rolling stock of electric

railways. Design and dynamics]. Moscow: Transport Publ., 1974. 232 p.

3. Kil'chevskii N.A. Kurs teoreticheskoi mekhaniki. T 2. Dinamika sistemy, analiticheskaya mekhanika, elementy teorii potentsiala, mekhaniki splushnoi sredy, spetsial'noi i obshchei teorii otnositel'nosti [Course of theoretical mechanics. Volume 2. System dynamics, analytical mechanics, elements of potential theory, continuum mechanics, special and general relativity]. Moscow: Nauka Publ, 1977. 543 p.

4. Vibratsii v tehnikе (spravochnik v 6 tomakh). Tom 1. Kolebaniya lineinykh sistem [Vibrations in Engineering (A handbook in 6 vol.). Vol. 1. Oscillations of linear systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 352 p.

5. Bolotin V.V. Dinamicheskaya ustoychivost' uprugikh sistem [Dynamic stability of elastic systems]. Moscow: GITTL Publ., 1956. 600 p.

6. Schmidt G. Parametricheskie kolebaniya [Parametric oscillations]. Moscow: Mir Publ., 1978. 336 p.

7. Cunningham W.J. Vvedenie v teoriyu nelineinykh sistem [Introduction to nonlinear analysis]. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1962. 456 p.

8. Filippov A.F. Differentsial'nye uravneniya s razryvnoi pravoi chast'yu [Differential equations with a discontinuous right-hand side]. *Matematicheskii sbornik* [Sbornik: Mathematics], 1960, vol. 51, no. 1, pp. 99 – 128.

9. Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava [Track and rolling stock interaction]. Moscow: Transport Publ., 1986. 558 p.

10. Pakhomov M.P., Nekhaev V.A. K voprosu o parametricheskikh kolebaniyakh podvizhnogo sostava [On the issue of parametric oscillations of the rolling stock]. *Sbornik statei «Voprosy uluchsheniya tyagovykh, energeticheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv elektrovozov»* [Proceedings «Issues of improving the traction, energy and operational properties of electric locomotives»]. Sverdlovsk, 1978, no. 59, pp. 91–96.

11. Pakhomov M.P., Galiev I.I., Nekhaev V.A. Matematicheskaya model kolebaniy telezhki lokomotiva pri dvizhenii po neravnouprugomu vdol' rel'sovogo zvena puti [Mathematical model of oscillations of a locomotive bogie when moving along an unequally elastic track along a rail link]. *Mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov «Vzaimodeistvie podvizhnogo sostava i puti i dinamika lokomotivov dorog Sibiri, Dalnego Vostoka i Krainego Severa»* [Interuniversity topics proceedings «Interaction of rolling stock and tracks and dynamics of locomotives on the roads of Siberia, the Far East and the Far North»]. Omsk, 1981, pp. 9–15.

12. Biryukov I.V., Savos'kin A.N., Burchak G.P., Serdobintsev E.V., L'vov N.V., Korotenko M.L., Rybnikov E.K., Derkach B.A. Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava [Mechanical part of traction rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1992. 440 p.

13. Frishman M.A., Levankov I.S. Issledovanie osobennostei izmeneniya vertikal'noi zhestkosti puti po ego dline [Research of the features of the change in the vertical stiffness of the path along its length]. *Nauchnye trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Dnepropetrovsk institute of engineers of transport], 1972, no. 138, pp. 48–57.

14. Frishman M.A., Levankov I.S. Ob osobennostyakh izmeneniya vertikal'noi zhestkosti vdol' puti s tyazhelym tipom verkhnego stroeniya [About the peculiarities of the change in vertical stiffness along the path with a heavy type of upper structure]. *Nauchnye trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Dnepropetrovsk institute of engineers of transport], 1973, no. 142, pp. 3–10.

15. Frishman M.A., Lipovskii R.S., Danovich V.D. Eksperimental'noe opredelenie chastotnykh kharakteristik rel'soshpal'noi reshetki [Experimental determination of the frequency characteristics of the rail-sleeper grating]. *Nauchnye trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Dnepropetrovsk institute of engineers of transport], 1978, no. 198/20, pp. 3–11.

16. Burchak G.P. Kolebaniya nepodressorennoi massy na neravnouprugomu puti s nerovnostyu [Oscillations of the unsprung mass on an unequal elastic track with unevenness]. *Nauchnye trudy Akademii kommunisticheskogo khozyaistva im. K.D. Panfilova* [Scientific proceedings of Academy of communistic facilities named after K.D. Panfilov], 1980, no. 175, pp. 84–98.

17. Pan'kin N.A., Stesin I.M., Tsenov V.P. Kolebatel'nye dvizheniya ekipazhei pri parametricheskom vozmushchenii [Oscillatory motions of vehicles under parametric perturbation]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of All-Union scientific-research institute of railway transport], 1978, no. 1, pp. 27–30.

18. Pan'kin N.A., Stesin I.M., Belen'kaya Yu.G. Vertikal'nye kolebaniya ekipazha, voznikayushchie pri dvizhenii po neravnouprugomu puti [Vertical oscillations of the vehicle, arising when moving along an unequal-elastic path]. *Nauchnye trudy Moskovskogo instituta inzhenerov transporta* [Scientific proceedings of Moscow institute of engineers of transport], 1979, no. 640, pp. 24–32.

### Информация об авторах

**Нехаев Виктор Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: nehaevva@rambler.ru.

**Леоненко Елена Геннадьевна**, преподаватель электромеханического отделения, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; e-mail: leonenko-eg@mail.ru.

### Information about the authors

**Victor A. Nekhaev**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: nehaevva@rambler.ru.

**Elena G. Leonenko**, Lecturer of the Electromechanical Department, Krasnoyarsk Rail Transport Institute – Branch of the Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: leonenko-eg@mail.ru.

## Разработка технических решений по уменьшению искажения синусоидальности кривой напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки

И.С. Овечкин, Е.Ю. Пузина✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉lena-rus05@mail.ru

### Резюме

На сегодняшний день в системах электроснабжения устройств автоблокировки часто фиксируется несоответствие показателей качества электроэнергии требованиям нормативной документации. Усугубляется данная проблема и тем, что к концу 2024 г. на участках Восточного полигона запланирована установка системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями в микропроцессорных шкафах – АБТЦ-МШ. Так как данная система построена на микропроцессорной базе, которая крайне чувствительна к качеству электроэнергии, то возникает вероятность отказов, что приведет к простоям поездов, а это является недопустимым. В статье описываются системы электроснабжения устройств автоблокировки одного из участков Восточного полигона. Представлены результаты замеров показателей качества электроэнергии на двух постах электрической централизации исследуемого участка. Выявлено несоответствие измеренных показателей требованиям стандарта. Произведена разработка модели системы электроснабжения устройств автоблокировки указанного участка в программно-вычислительном комплексе Fazonord. Модель призвана упростить процесс анализа отклонений показателей качества электроэнергии от допустимых значений и ускорить процесс подготовки технических решений по уменьшению данных отклонений. В работе уделяется особое внимание несинусоидальности напряжения на стороне низкого напряжения 0,4 кВ, к которой непосредственно через понижающие трансформаторы подключаются потребители автоблокировки и оборудование АБТЦ-МШ. Проведен анализ возможных мероприятий по снижению несинусоидальности, аргументирован выбор использования активных фильтров гармоник, показаны результаты моделирования до и после установки активных фильтров гармоник и сделаны соответствующие выводы об эффективности их применения.

### Ключевые слова

несинусоидальность напряжения, активные фильтры гармоник, устройства автоблокировки, АБТЦ-МШ, качество электроэнергии

### Для цитирования

Овечкин И.С. Разработка технических решений по уменьшению искажения синусоидальности кривой напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки / И.С. Овечкин, Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 112–123. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).112-123.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 07.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 15.09.2023 г.; принята к публикации: 18.09.2023 г.

## Development of technical solutions to reduce the distortion of the sinusoidal voltage curve of overhead lines supplying automatic blocking devices

I.S. Ovechkin, E.Yu. Puzina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

### Abstract

At the moment, in the power supply systems of automatic blocking devices, a discrepancy between power quality indicators and the regulatory documentation requirements is often recorded. This problem is aggravated by the fact that by the end of 2024, in sections of the Eastern Polygon the installation of an automatic locking system with tone track circuits in microprocessor cabinets - ABTC-MSh is planned. Since this system is built on a microprocessor base which is extremely sensitive to the quality of electricity, there is a possibility of failures resulting in train downtime which is unacceptable. The article describes the power supply system for automatic blocking devices of one of the sections of the Eastern Polygon. The results of measurements of power quality indicators at two electrical centralization posts of the study area are presented. A discrepancy between the measured indicators and the requirements of the standard was revealed. A model of the power supply system for automatic blocking devices of the study area was developed in the program-calculating complex Fazonord. The model is designed to simplify the process of analyzing deviations of power quality indicators from acceptable values and speed up the process of developing technical solutions to reduce deviations in problematic indicators. In this work, the bias is made towards analyzing the non-sinusoidal voltage on the low voltage side of 0,4 kV, to which

automatic blocking consumers and ABTC-MSh equipment are connected directly through step-down transformers. An analysis of possible measures to reduce non-sinusoidality was carried out. A reasoned choice was made to use active harmonic filters. The simulation results before and after installation of the active harmonic filters are presented. Appropriate conclusions have been drawn about the effectiveness of using active harmonic filters.

### Keywords

non-sinusoidal voltage, active harmonic filters, automatic blocking devices, ABTTs-MSh, electricity quality

### For citation

Ovechkin I.S., Puzina E.Yu. Razrabotka tekhnicheskikh reshenii po umen'sheniyu iskazheniya sinusoidal'nosti krivoi napryazheniya vozduzhnykh linii, pitayushchikh ustroystva avtoblokirovki [Development of technical solutions to reduce the distortion of the sinusoidal voltage curve of overhead lines feeding automatic blocking devices]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 112–123. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).112-123.

### Article info

Received: September 7, 2023; Revised: September 15, 2023; Accepted: September 18, 2023.

### Введение

Тяговые подстанции (ТП) обеспечивают электропитание как тяговых, так и нетяговых потребителей. Последние в свою очередь делятся на железнодорожных и нежелезнодорожных потребителей.

К наиболее ответственным железнодорожным потребителям относятся устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), которые необходимы для обеспечения безопасности и бесперебойного движения поездов.

Анализ статистики железнодорожных сетей России показывает, что каждый год из-за отказов в системе электроснабжения сигнальных точек возникают задержки в движении нескольких тысяч поездов [1]. Это подчеркивает актуальность проблемы повышения надежности системы электроснабжения для устройств автоблокировки и указывает на необходимость улучшения качества поставляемой электроэнергии. Особенно остро данная проблема проявляется при увеличении масс перемещающихся поездов и снижении межпоездного интервала движения [2–6].

Для уменьшения искажений гармонического спектра напряжений в системах электроснабжения железных дорог переменного тока авторы технических решений рекомендуют применять следующие устройства:

- фильтры высших гармоник и фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), являющиеся традиционными средствами ограничения уровня гармоник;
- активные кондиционеры или фильтры гармоник (АКГ или АФГ);
- гибридные фильтры, представляющие собой комбинацию АКГ и ФКУ [7–14].

Опыт применения ФКУ показывает, что решить проблему ограничения высших гармоник с использованием только традиционных пассивных фильтров весьма сложно [7]. Прогресс в области силовой электроники и появление автономных инверторов, основанных на силовых модулях IGBT, стимулировали развитие нового направления в технологии фильтрации высших гармоник. Это привело к созданию АФГ.

Для более детального рассмотрения вопроса анализа эффективности мероприятий по уменьшению несинусоидальности напряжения в исследуемых системах электроснабжения необходимо применение достоверных математических моделей с корректным методом моделирования. Данная задача может быть решена с помощью применения компьютерного моделирования на основе подходов, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения [15].

В работе представлены модели участков Восточного полигона с имеющимися проблемами в области качества электроэнергии, что подтверждается экспериментальными исследованиями, выполненными специалистами одной из электротехнических лабораторий Восточного полигона (ЭЛ ВП). Далее приведены результаты моделирования исследуемой системы электроснабжения при использовании мероприятий по уменьшению несинусоидальности напряжения.

### Результаты экспериментальных исследований качества электроэнергии, выполненные специалистами электротехнической лаборатории

На рис. 1 и в табл. 1, 2 приведены результаты измерения показателей качества электри-

ческой энергии, полученные на постах электрической централизации (ЭЦ) для станций ДЛ и ЗМ специалистами одной из ЭЛ ВП.

На рис. 1 пределы изменения напряжения приведены с помощью измерительного оборудования к временному отрезку, характеризующимся максимальным влиянием высших гармоник.

По замерам показателей качества электроэнергии можно сделать вывод, что имеет место искажение синусоиды напряжения на посту ЭЦ станции ЗМ (рис. 1). Отрицательное медленное отклонение напряжения на посту ЭЦ станции ДЛ для всех трех фаз в течение 100 % времени измерения выходит за допустимый предел  $-10\%$  [16] и составляет от  $-14,1$  до  $-15\%$ .

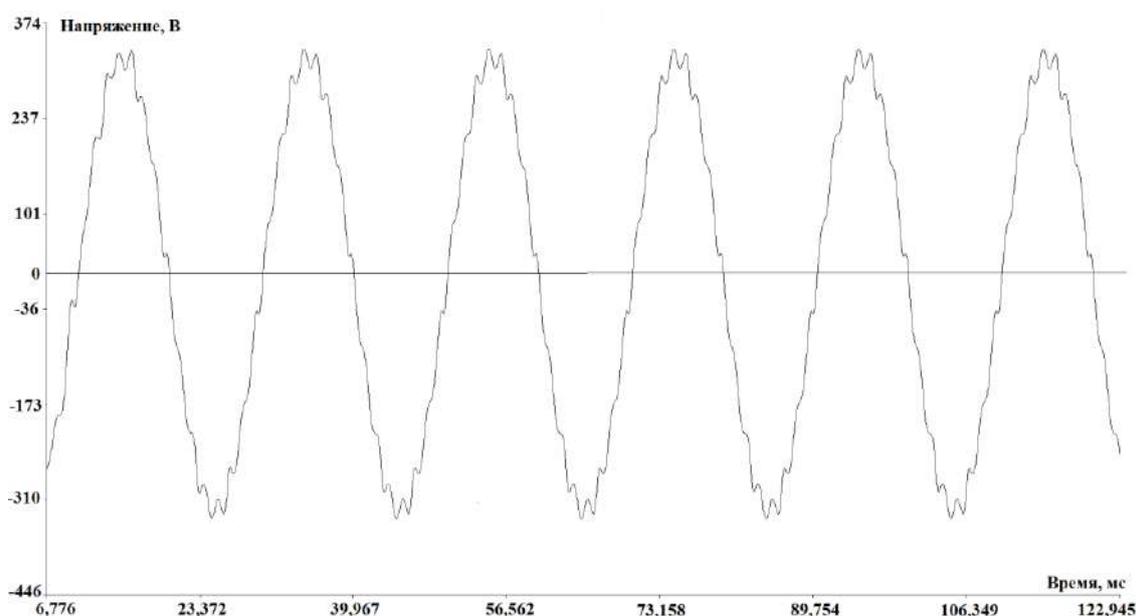


Рис. 1. Осциллограмма напряжения на посту электрической централизации на станции ЗМ  
Fig. 1. Voltage oscillogram at the electrical centralization post at the ZM station

Таблица 1. Значения медленного изменения напряжения на посту электрической централизации на станции ДЛ  
Table 1. Values of slow voltage change at the electrical centralization post at the DL station

Фаза Phase	Время измерения, % Measurement time, %	Пороговое нижнее значение, В/% Threshold lower value, V/%	Пороговое верхнее значение, В/% Threshold upper value, V/%
А	100	189 / $-14,1$	244 / $+10,9$
	95	198 / $-10,0$	244 / $+10,9$
В	100	187 / $-15,0$	244 / $+10,9$
	95	198 / $-10,0$	244 / $+10,9$
С	100	189 / $-14,1$	244 / $+10,9$
	95	198 / $-10,0$	244 / $+10,9$

Таблица 2. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в течение 100% времени измерения на посту электрической централизации на станции ДЛ

Table 2. Total harmonic voltage coefficient values for 100% measurement time at the electrical centralization post at the DL station

Фаза Phase	Значение, % Value, %		
	Минимальное Minimum	Среднее Medium	Максимальное Maximum
А	4,9	7,488	10,2
В	7,5	11,719	15,6
С	11,5	14,869	18,2

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в течение 100 % времени измерения на посту ЭЦ станции ДЛ для напряжений фаз В и С превышают допустимый предел 12 % [16] и равны 15,6 и 18,2 % соответственно.

### **Разработка модели системы электроснабжения устройств автоблокировки**

Для проведения исследования режимов работы системы электроснабжения железной дороги (СЭЖД) требуется разработать модели для отдельных компонентов, таких как линии электропередачи, контактная сеть, силовые трансформаторы, устройства компенсации реактивной мощности и прочие элементы. Кроме того, необходимо создать алгоритм, который определит взаимодействие между этими компонентами.

1. Для моделирования линий электропередачи нужно учесть их электрические параметры, геометрию, длину и тип проводов, а также потери энергии при ее передаче.

2. Модель контактной сети должна включать в себя геометрические характеристики, материал контактов и учитывать влияние движения поездов на ее работу.

3. Для силовых трансформаторов следует создать математические модели, учитывающие их эффективность и характеристики, а также потери мощности.

4. Устройства компенсации реактивной мощности требуют наличие моделей, описывающих их функциональность и влияние на сеть.

5. Алгоритм взаимодействия поможет определить, как каждый из компонентов будет функционировать в реальном времени, чтобы обеспечить стабильное и надежное электроснабжение железной дороги в различных режимах работы.

Эти модели и алгоритм взаимодействия будут служить основой для исследования и оптимизации работы СЭЖД.

Для выполнения этих задач создан программно-вычислительный комплекс (ПВК) Fazonord.

С помощью ПВК Fazonord разработана модель одного из участков системы электроснабжения Восточного полигона, которая с допустимой точностью описывает все процессы, протекающие в электрических сетях [15].

На рис. 2 представлен фрагмент разрабо-

танной модели, на котором изображена система внешнего тягового и нетягового электроснабжения. В системе внешнего электроснабжения электроэнергия передается по воздушным линиям (ВЛ) 110–220 кВ. Для дополнительного отбора мощности из ВЛ 220 кВ в ВЛ 110 кВ используется автотрансформатор. В данном случае это трансформатор марки АДЦТН-250000/220/110-У1. Питание тяговой сети осуществляется от ВЛ 110 кВ через силовой трансформатор марки ТДТНЖ-40000/110/27,5 У1.

В качестве нетяговых потребителей выступают устройства СЦБ, подключенные через понижающие трансформаторы к ВЛ СЦБ 6 кВ и ВЛ продольного электроснабжения (ВЛ ПЭ) 10 кВ. Основное питание организовано от ВЛ СЦБ 6 кВ. ВЛ ПЭ 10 кВ является резервной.

На рис. 2 слева отображено питание ВЛ СЦБ 6 кВ и ВЛ ПЭ 10 кВ от районного трансформатора. Питание ВЛ СЦБ 6 кВ осуществляется от районного трансформатора, в данном примере ТДТН-20000/110/35/10, далее от распределительных устройств (РУ) 10 кВ осуществляется трансформация по уровню напряжения 10/0,23 кВ с помощью трансформатора ТМ-400/10/0,23 с дальнейшим повышением 0,23/6 кВ благодаря трансформатору СЦБ ТМ-320/0,23/6. Затем с помощью фидера СЦБ «Восток» напряжение подается в линию СЦБ 6 кВ, выполненную проводом АС-50.

Кроме того, на рис. 2 справа изображено питание ВЛ СЦБ 6 кВ от тягового трансформатора. Данная часть модели отличается от предыдущей тем, что питание ВЛ 6 кВ и ВЛ 10 кВ осуществляется от тягового трансформатора ТДТНЖ-40000/110/27,5/35 и тем, что напряжение к РУ 10 кВ подается от РУ 35 кВ через трансформатор ТМ-4000/35/10.

### **Результаты исследования показателей качества электроэнергии**

Основной целью на данном этапе явилась оценка показателей качества электроэнергии в существующей системе электроснабжения устройств СЦБ с помощью разработанной модели, а именно, коэффициентов гармонических составляющих напряжения и их суммарного коэффициента при питании устройств автоблокировки от ВЛ 6 кВ.

Полученные результаты расчета представлены в табл. 3 и 4.

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения оценены только для тех гармоник напряжения, для которых их величины превышают нормативные значения [16].

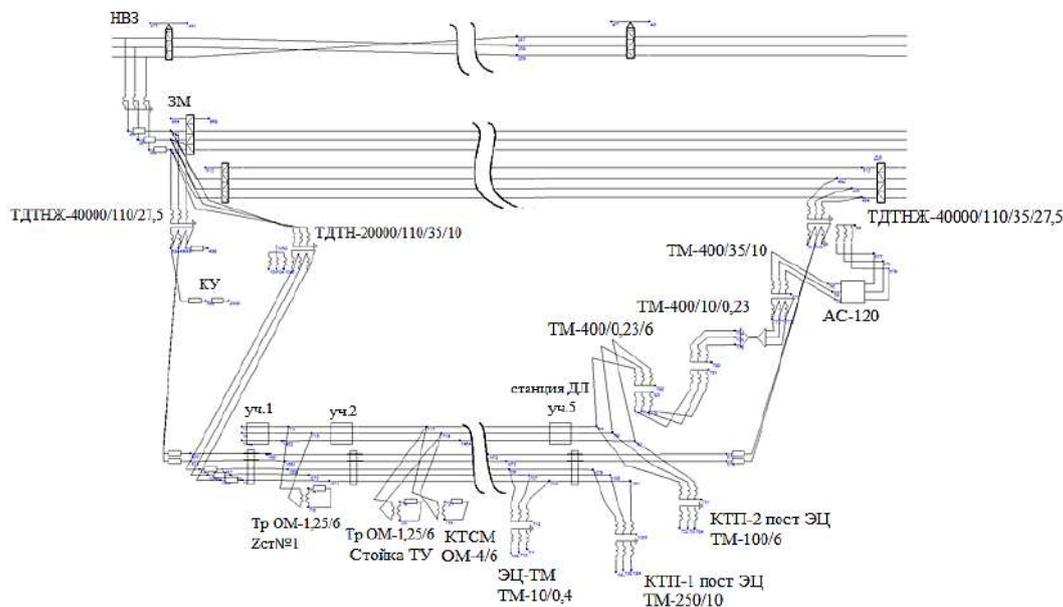


Рис. 2. Фрагмент модели системы внешнего тягового электроснабжения и электроснабжения устройств автоблокировки

Fig. 2. Fragment of the model of external traction power supply system and power supply of automatic blocking devices

Таблица 3. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U(n)$   
Table 3. Values of the coefficients of harmonic voltage components  $K_U(n)$

Объект Object	Фаза Phase	№ гармоники № of harmonic	Нормативное значение $K_U(n)$ , % Normative value $K_U(n)$ , %		Рассчитанное значение $K_U(n)$ , % Calculated value $K_U(n)$ , %		
			В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time	В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time	
ЭЦ-ТМ1	A	3	5,0	7,50	5,54	6,96	
		13	3,0	4,50	4,61	6,25	
		15	0,3	0,45	1,15	1,50	
	B	13	3,0	4,50	5,10	7,78	
		15	0,3	0,45	1,09	1,63	
		3	5,0	7,50	8,17	10,18	
ЭЦ-ТМ2	C	7	5,0	7,50	1,40	1,70	
		11	3,5	5,25	4,45	4,99	
		13	3,0	4,50	9,07	10,76	
	КТП-2	A	15	0,3	0,45	1,08	1,24
			3	5,0	7,50	5,46	6,85
			13	3,0	4,50	4,15	5,61
КТП-2	B	15	0,3	0,45	1,01	1,32	
		13	3,0	4,50	4,60	7,01	
		15	0,3	0,45	0,96	1,44	
	C	3	5,0	7,50	8,07	10,05	
		13	3,0	4,50	8,15	9,67	
		15	0,3	0,45	0,94	1,09	
КТП-1	A	3	5,0	7,50	5,50	6,90	
		9	1,5	2,25	0,47	0,68	

	B	13	3,0	4,50	4,26	5,76	
		15	0,3	0,45	1,04	1,36	
		13	3,0	4,50	4,74	7,22	
		15	0,3	0,45	1,00	1,49	
		C	3	5,0	7,50	8,12	10,12
			11	3,5	5,25	4,20	4,71
	13		3,0	4,50	8,39	9,93	
	ЭЦ-ТМЗ	A	15	0,3	0,45	0,97	1,12
			3	5,0	7,50	5,17	6,41
11			3,5	5,25	2,34	3,27	
13			3,0	4,50	5,59	7,53	
B		15	0,3	0,45	1,46	2,01	
		13	3,0	4,50	7,52	11,39	
C		15	0,3	0,45	0,96	1,34	
		3	5,0	7,50	5,50	6,91	
		11	3,5	5,25	4,68	6,38	
		13	3,0	4,50	11,75	13,68	
			15	0,3	0,45	1,46	1,70

Таблица 4. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$ Table 4. Values of the total harmonic voltage coefficient  $K_{U(n)}$ 

№	Объект Object	Фаза Phase	Рассчитанное значение $K_{U(n)}$ , % Calculated value $K_{U(n)}$ , %	
			В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time
1	ЭЦ-ТМ1	A	8,54	10,90
		B	6,13	7,84
		C	12,20	14,73
2	КТП-2	A	8,24	10,36
		B	6,08	7,80
		C	11,37	13,90
3	КТП-1-4969 км	A	8,35	10,52
		B	7,45	11,14
		C	11,59	14,12
4	ЭЦ-ТМЗ	A	8,64	11,43
		B	9,25	13,23
		C	13,97	15,73

Из результатов, представленных в табл. 4, видим, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения превышает как допустимое значение 8 %, так и предельное значение 12 % [16].

На основании несоответствия показателей качества электроэнергии допустимым значениям, регламентируемых ГОСТ 32144–2013, необходимо разработать комплекс мероприятий, обеспечивающих достижение проблемных показателей нормативных значений.

#### Разработка мероприятий по уменьшению коэффициентов гармонических составляющих напряжения

Как отмечено ранее, с целью приближения

искаженной кривой тока к синусоидальной форме в СЭЖД переменного тока возможно использовать такие устройства, как фильтры высших гармоник и ФКУ; АКГ или АФГ; гибридные фильтры на базе совмещения АКГ и ФКУ.

Анализ имеющегося опыта применения указанных устройств и развитие силовой электроники в сочетании с разработкой автономных инверторов с использованием силовых модулей IGBT позволили создать так называемые гибридные фильтры. Такие устройства сочетают в себе положительные характеристики автономного инвертора на модулях IGBT и пассивного фильтра и называются АКГ или АФГ.

В дальнейшем рассматривается применение АФГ как наиболее перспективного и эф-

фективного технического решения для улучшения коэффициента гармонического искажения.

На рис. 3 представлен активный фильтр гармоник SAF-400V-100A-70kVAr 3F/4LIP20 компании ООО «Миркон» (Россия).



**Рис. 3.** Внешний вид активного фильтра гармоник SAF-400V-100A-70kVAr 3F/4LIP20

**Fig. 3.** Appearance of active harmonic filter SAF-400V-100A-70kVAr 3F/4LIP20

Данный модуль имеет несколько режимов компенсации: гармонический, реактивный и трехфазный дисбаланс.

Компенсирующая способность для них может устанавливаться с целью комплексного решения проблемы качества питания на стороне распределения низкого напряжения.

Модуль обладает возможностью:

- фильтровать от 2 до 50 гармоник одновременно, а также может фильтровать от 2 до 50 гармоник определенного порядка в соответствии с настройкой;

- динамически и плавно компенсировать индуктивную и емкостную реактивную мощность, а коэффициент мощности системы после компенсации составляет 0,99.

После компенсации в пределах номинальной мощности, дисбаланс токов трехфазной активной нагрузки системы составляет менее 5 %.

Работа модуля характеризуется следующими особенностями:

- быстрый отклик;
- высокая управляемость;
- функция автоматического ограничения тока;
- отсутствие перегрузки.

Имеется возможность подключения и управления несколькими аналогичными устройствами параллельно в соответствии с изменившимися фактическими требованиями.

Есть множество функций защиты от перегрузки по току, перенапряжения, перегрева, ошибки последовательности фаз, от потери фазы и т.д.

Интерфейсы связи включают в себя стандартные интерфейсы RS485 и CAN, которые могут быть сконфигурированы для реализации обмена информацией с другим оборудованием блока, а модуль проводной/беспроводной связи также может быть сконфигурирован для удаленного мониторинга данных.

Для более наглядного отображения структуры АФГ на рис. 4 условно изображена силовая цепь одной фазы. Активный фильтр гармоник содержит следующие основные части:

- IGBT-преобразователь;
- устройство управления и контроля;
- блок защиты и «мягкого» пуска;
- токовые датчики.

Трехфазный преобразователь построен на IGBT-транзисторах, коммутируемых с тактовой частотой 16 кГц. Также в его состав входят два конденсатора С1, С2 и линейные дроссели (Др1). В состав устройства управления и контроля входят блоки:

- анализа гармоник тока;
- установки номеров компенсируемых гармоник;
- управления преобразователем и мониторинга.

На анализатор гармоник поступают сигналы с быстродействующих датчиков тока нагрузки (ДТ1) и тока АФГ (ДТ2). Блок защиты и «мягкого» пуска содержит быстродействующие предохранители и с помощью контактора и балластного сопротивления обеспечивает плавный заряд конденсаторов С1, С2 в период включения АФГ.

Принцип работы АФГ заключается в следующем: устройство управления и контроля мощностью использует процессор для измерения мощности, потребляемой нелинейной нагрузкой, и вычисляет параметры гармоник тока нагрузки в реальном времени. Затем с помощью IGBT-ключей это устройство добавляет компоненты тока фазы в сеть электроснабжения, чтобы обеспечить чистую синусоидальную форму кривых напряжения и тока в системе электроснабжения.

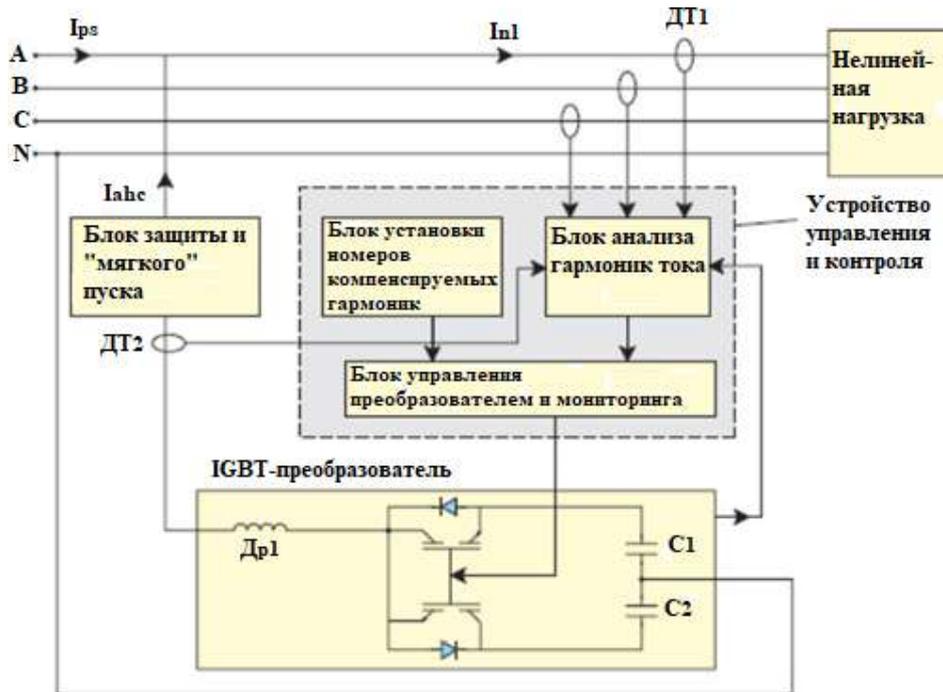


Рис. 4. Структурная схема активного фильтра гармоник  
Fig. 4. Block diagram of an active harmonic filter

Основное свойство АФГ заключается в подавлении высших гармоник в точке е установки, и это свойство может быть промоделировано с использованием идеализированных моделей в ПВК Fazonord. Сведение к нулю значения напряжения высшей гармоники в месте подключения АФГ дает положительный эффект в виде отсутствия дополнительных резонансов, которые могли бы возникнуть при использовании пассивных фильтров.

На рис. 5 приведена модель АФГ, которая приводит к подавлению высших гармоник и при этом практически не вносит дополнительных реактансов в расчетную схему.

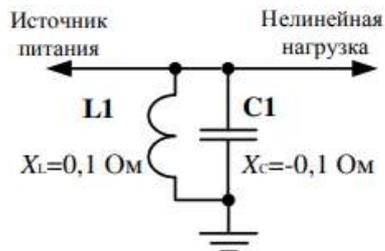


Рис. 5. Модель активного фильтра гармоник  
Fig. 5. Active harmonic filter model

Фильтр-пробка L1, C1 создает значительное сопротивление для тока частотой 50 Гц и малое сопротивление для токов высших гармо-

ник. Так, для третьей гармоники сопротивление цепи сводится к величине порядка всего лишь –  $j0,04 \text{ Ом}$ , что позволяет предотвратить дополнительные паразитные резонансы. Реактанс RL-элементов фильтра-пробки должен быть нулевым. Согласно [15], для решения системы уравнений установившегося режима может быть применен только метод Гаусса, поскольку матрица Якоби, применяемая в методе Ньютона, становится вырожденной. Так как активное сопротивление RL-элементов фильтра будет нулевым, то при вычислении матрицы Якоби часть коэффициентов системы уравнений также станет равной нулю, вследствие чего определитель (якобиан) равен нулю. Следовательно, система не имеет решения.

Решить эту проблему позволяет метод Гаусса, где с помощью умножения уравнений на соответствующие коэффициенты с дальнейшим вычитанием или сложением уравнений появляется возможность определить неизвестные переменные, не прибегая к вычислению определителя.

Для кардинального решения вопроса не-синусоидальности необходима установка АФГ в контактной сети [17].

На рис. 6 представлена разработанная авторами модель АФГ в ПВК Fazonord.

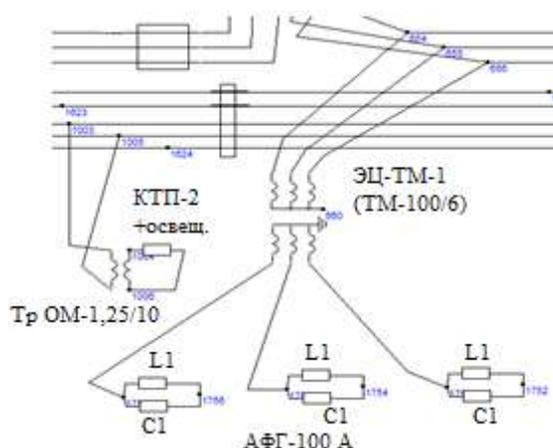


Рис. 6. Модель активного фильтра гармоник в Fazonord

Fig. 6. Active harmonic filter model in Fazonord

На рис. 6  $L1 = 0,1$  Ом, а  $C1 = -0,1$  Ом согласно рис. 5. Общий правый узел элементов  $L1$  и  $C1$  заземлен ( $G_{ш} = 1\ 000$  См).

Описанная модель АФГ устраняет несинусоидальность напряжения именно у потребителей. Возможно также решить данный вопрос

путем установки АФГ на электроваззах. Для этого необходимо каскадное включение инверторов и расчет их параметров. Расчет параметров для АФГ с пятиуровневым каскадным инвертором сделан в рамках работы [17].

На исследуемом участке Восточного полигона предлагается установить АФГ в количестве четырех штук на стороне 0,38 кВ таких потребителей, как посты ЭЦ и модули ЭЦ-ТМ.

Результаты моделирования при установке АФГ представлены в табл. 5 и 6.

Из результатов, представленных в табл. 5 и 6, видим, что коэффициенты гармонических составляющих напряжения для нечетных гармоник и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения не превышают ни допустимого значения (8 %) для суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, ни предельного (12 %), регламентируемых [16]. Поэтому можно прийти к заключению, что установка АФГ эффективна и целесообразна.

Таблица 5. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения

Table 5. Values of the coefficients of harmonic voltage components

Объект Object	Фаза Phase	№ гармоники № of harmonic	Нормативное значение $K_{U(n)}$ , % Normative value $K_{U(n)}$ , %		Рассчитанное значение $K_{U(n)}$ , % Calculated value $K_{U(n)}$ , %	
			В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time	В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time
ЭЦ-ТМ1	A	3	5,0	7,50	0,15	0,15
		13	3,0	4,50	0,01	0,01
		15	0,3	0,45	0	0
	B	13	3,0	4,50	0,01	0,01
		15	0,3	0,45	0	0
		3	5,0	7,50	0,17	0,18
	C	7	5,0	7,50	0,01	0,01
		11	3,5	5,25	0,01	0,01
		13	3,0	4,50	0,02	0,03
15		0,3	0,45	0	0	
КТП-2	A	3	5,0	7,50	0,21	0,23
		13	3,0	4,50	0,02	0,02
		15	0,3	0,45	0	0
	B	13	3,0	4,50	0,02	0,02
		15	0,3	0,45	0	0
		3	5,0	7,50	0,25	0,26
C	13	3,0	4,50	0,03	0,03	
	15	0,3	0,45	0	0	
КТП-3	C	15	0,3	0,45	0	0
КТП-1	A	3	5,0	7,50	0,24	0,26
		9	1,5	2,25	0,01	0,01
		13	3,0	4,50	0,02	0,02
		15	0,3	0,45	0	0

	B	13	3,0	4,50	0,02	0,02
		15	0,3	0,45	0	0
	C	3	5,0	7,50	0,29	0,3
		11	3,5	5,25	0,01	0,02
		13	3,0	4,50	0,03	0,04
		15	0,3	0,45	0	0
ЭЦ- ТМ2	A	3	5,0	7,50	0,19	0,2
		11	3,5	5,25	0,01	0,01
		13	3,0	4,50	0,01	0,02
		15	0,3	0,45	0	0
	B	13	3,0	4,50	0,02	0,02
		15	0,3	0,45	0	0
	C	3	5,0	7,50	0,17	0,19
		11	3,5	5,25	0,01	0,01
		13	3,0	4,50	0,03	0,03
		15	0,3	0,45	0	0

Таблица 6. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

Table 6. Total harmonic voltage coefficient values

Объект Object	Фаза Phase	Рассчитанное значение $K_{U(n)}$ , % Calculated value $K_{U(n)}$ , %	
		В течение 95 % времени Within 95% of time	В течение 100 % времени Within 100% of time
ЭЦ-ТМ1	A	0,16	0,16
	B	0,17	0,17
	C	0,18	0,19
КТП-2	A	0,23	0,23
	B	0,24	0,25
	C	0,26	0,27
КТП-1	A	0,26	0,27
	B	0,28	0,28
	C	0,29	0,31
ЭЦ-ТМ2	A	0,20	0,22
	B	0,11	0,11
	C	0,18	0,20

### Заключение

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что включение АФГ на стороне низкого напряжения 0,4 кВ постов ЭЦ уменьшает искажение синусоиды напряжения до допустимых значений, регламентируемых нормативной документацией [16].

Поэтому данное техническое мероприятие предлагается к внедрению на проблемных участках Восточного полигона с точки зрения качества электрической энергии в системе электроснабжения автоблокировки и на сети российских железных дорог в целом.

Такое техническое решение существенно повысит надежность работы устройств автоблокировки и обеспечит повышение безопасности перевозочного процесса и также существенно сократит экономический ущерб от потенциального (в случае отказов устройств автоблокировки) простоя поездов. Вследствие этого значительно улучшатся экономические показатели работы не только системы тягового электроснабжения железных дорог, но и в целом всей железнодорожной инфраструктуры [18–20].

### Список литературы

1. Аржанников Б.А., Сергеев Б.С., Набойченко И.О. Системы электроснабжения устройств СЦБ. Екатеринбург : УрГУПС, 2009. 99 с.
2. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро – Таксимо ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 2. С. 306–310.

3. Ким А.В., Красновская О.П., Макашева С.И. Непрерывный мониторинг и прогноз показателей качества электрической энергии как составляющая часть энергосберегающих технологий // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. Хабаровск, 2017. Т. 1. С. 65–68.
4. Башарин В.Л., Пузина Е.Ю. Оценка эффективности применения устройств компенсации реактивной мощности на тяговой подстанции Кежемская ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 2. С. 229–233.
5. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018. P. 1–5. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
6. Куцый А.П., Овечкин И.С., Галков А.А. Повышение пропускной способности участка Якурим – Киренга для обеспечения тяги сдвоенных электроподвижных составов массой 14200 тонн // Молодая наука Сибири. 2022. № 2 (16). С. 137–149. URL : <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/778>. (Дата обращения 18.08.2023).
7. Селезнев А.С., Кондрат С.А., Третьяков А.Н. Об эффективности применения фильтров при нормализации несинусоидальных режимов // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 8 (103). С. 177–183.
8. Пулятков А.В., Трофимов Ю.А., Скоробогатов М.Э. Комплексные решения по повышению устойчивости работы устройств автоматической локомотивной сигнализации на участках с электротягой переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015. Т. 1. С. 328–332.
9. Розанов Ю.К., Гринберг Р.П. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения // Электротехника. 2006. № 10. С. 55–60.
10. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. М. : МЭИ, 2006. 319 с.
11. Третьяков Е.А. Управление качеством электрической энергии в распределительных сетях железных дорог. Омск : ОмГУПС, 2013. 191 с.
12. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев : Наук. думка, 1985. 267 с.
13. Шидловский А.К., Новский В.А., Капльгный Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. Киев : Наук. думка, 1989. 311 с.
14. Гринько Н.А., Долгов А.П., Рогов Г.В. Проблема несинусоидальности во внешних сетях электроснабжения железных дорог переменного тока и пути ее решения // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов : сб. тр. седьмой Всерос. науч.-техн. конференции с междунар. участием. Благовещенск, 2013. С. 144–147.
15. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск : ИрГУПС, 2011. 160 с.
16. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М. : Стандартинформ, 2014. 19 с.
17. Свидетельство № 2023619000. Расчет параметров активного кондиционера гармоник тока для систем тягового электроснабжения 25 кВ с каскадным пятиуровневым инвертором / А.П. Куцый, А.А. Галков, И.С. Овечкин. № 2023618169 : заявл. 25.04.2023 ; опубл. 03.05.2023.
18. Каимов Е.В., Оленцевич В.А., Власова Н.В. Проблемы формирования, развития и реконструкции элементов инфраструктурного комплекса железных дорог // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита, 2022. Т. 1. С. 288–296.
19. Barykina Yu.N., Puchkova N.V., Budaeva M.S. Analysis of innovation activity financing methods in Russian economy // Research Paradigms Transformation in Social Sciences : European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. Irkutsk, 2018, Vol. 50. P. 120–127.
20. Оценка финансового обеспечения технологических инноваций для развития региональных экономических систем / А.В. Распутина, В.И. Буньковский, Р.Ф. Старков и др. // Экономика и управление: проблемы, решения. 2023. Т. 1. № 7 (139). С. 57–63.

### References

1. Arzhannikov B.A., Sergeev B.S., Naboichenko I.O. Sistemy elektrosnabzheniya ustroystv STsB [Power supply systems for signaling devices]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2009. 99 p.
2. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Churo – Taksimo VSZhD [Strengthening the traction power supply system of the Churo – Taksimo section of the Eastern Siberian Railway]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport: science, education, production»]. Rostov-on-Don, 2016, vol. 2, pp. 306–310.
3. Kim A.V., Krasnovskaya O.P., Makasheva S.I. Npreryvnyi monitoring i prognoz pokazatelei kachestva elektricheskoi energii kak sostavlyayushchaya chast' energosberegayushchikh tekhnologii [Continuous monitoring and forecast of electric energy quality indicators as an integral part of energy-saving technologies]. *Nauchno-tekhicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of Asia-Pacific countries in the 21st century], 2017, vol. 1, pp. 65–68.
4. Basharin V.L., Puzina E.Yu. [Evaluation of the effectiveness of the use of reactive power compensation devices at the Kezhemskaya VSZD traction substation]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport : nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport: science, education, production»]. Rostov-on-Don, 2016, vol. 2, pp. 229–233.
5. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation. *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, 2018, pp. 1–5.
6. Kutsyi A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Povyshenie propusknoi sposobnosti uchastka Yakurim – Kirenga dlya obespeche-

nya tyagi sdvoennykh elektropodvizhnykh sostavov massoi 14 200 t [Increasing the capacity of the Yakurim – Kirenga section to provide traction for dual electric rolling stock weighing 14 200 tons]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2022, no. 2 (16), pp. 137–149. Available at: <https://ojs.ircgups.ru/index.php/mns/article/view/778>. (Accessed August 18, 2023).

7. Seleznev A.S., Kondrat S.A., Tret'yakov A.N. Ob effektivnosti primeneniya fil'trov pri normalizatsii nesinusoidal'nykh rezhimov [On the effectiveness of using filters when normalizing non-sinusoidal modes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2015, no. 8 (103), pp. 177–183.

8. Pul'tyakov A.V., Trofimov Yu.A., Skorobogatov M.E. Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoychivosti raboty ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii na uchastkakh s elektrotiyagoi peremennogo toka [Integrated solutions to improve the stability of automatic locomotive signaling devices in areas with alternating current electric traction]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2015, vol. 1, pp. 328–332.

9. Rozanov Yu.K., Grinberg R.P. Gibrnidnye fil'try dlya snizheniya nesinusoidal'nosti toka i napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya [Hybrid filters for reducing non-sinusoidal current and voltage in power supply systems]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2006, no. 10, pp. 55–60.

10. Kartashov I.I., Tul'skii V.N., Shamonov R.G., Sharov Yu.V., Vorob'ev A.Yu. Upravlenie kachestvom elektroenergii [Electricity quality management]. Moscow: MEI Publ., 2006. 319 p.

11. Tret'yakov E.A. Upravlenie kachestvom elektricheskoi energii v raspredelitel'nykh setyakh zheleznykh dorog [Electrical energy quality management in railway distribution networks]. Omsk: OmGUPS Publ., 2013. 191 p.

12. Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyakh [Improving energy quality in electrical networks]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1985. 267 p.

13. Shidlovskii A.K., Novskii V.A., Kaplychnyi N.N. Stabilizatsiya parametrov elektricheskoi energii v raspredelitel'nykh setyakh [Stabilization of electrical energy parameters in distribution networks]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1989. 311 p.

14. Grin'ko N.A., Dolgov A.P., Rogov G.V. Problema nesinusoidal'nosti vo vneshnikh setyakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka i puti ee resheniya [The problem of non-sinusoidality in external power supply networks of AC railways and ways to solve it]. *Sbornik trudov sed'moi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»* [Proceedings of the Seventh All-Russian Scientific and Technical Conference with International participation «Energy: Management, quality and efficiency of energy resources use»]. Blagoveshchensk, 2013, pp. 144–147.

15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Metody sovместnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Methods for joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011. 160 p.

16. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovместimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 19 p.

17. Kutsyi A.P., Galkov A.A., Ovechkin I.S. Certificate of registration of a computer program 2023619000, 03.05.2023.

18. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Problemy formirovaniya, razvitiya i rekonstruktsii elementov infrastrukturnogo kompleksa zheleznykh dorog [Problems of formation, development and reconstruction of elements of the railway infrastructure complex]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2-kh t.)* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2022, vol. 1, pp. 288–296.

19. Barykina Yu.N., Puchkova N.V., Budaeva M.S. Analysis of innovation activity financing methods in Russian economy. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences «Research Paradigms Transformation in Social Sciences»*. Irkutsk, 2018, vol. 50, pp. 120–127.

20. Rasputina A.V., Bun'kovskii V.I., Starkov R.F., Vyaznikov V.E. Otsenka finansovogo obespecheniya tekhnologicheskikh innovatsii dlya razvitiya regional'nykh ekonomicheskikh sistem [Assessment of financial support for technological innovations for the development of regional economic systems]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya* [Economics and management: problems, solutions], 2023, vol. 1, no. 7 (139), pp. 57–63.

### Информация об авторах

**Овечкин Илья Сергеевич**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: iliaov2015@mail.ru.

**Пузина Елена Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

### Information about the authors

**Ilya S. Ovechkin**, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: iliaov2015@mail.ru.

**Elena Yu. Puzina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

## Повышение качества регулирования асинхронных двигателей с модальным управлением

Ю.М. Кулинич, Д.А. Стародубцев✉

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉dastarodubcev21@gmail.com

### Резюме

На сегодняшний день область применения асинхронных машин наиболее обширна. Асинхронные двигатели применяются не только в промышленности как приводы конвейеров или приточно-вытяжной вентиляции, но и используются на железнодорожном транспорте. Асинхронные двигатели малой мощности эксплуатируются также в мотор-вентиляторных, мотор-компрессорных установках, их применяют и в качестве приводов расщепителей фаз. Тенденция развития электроподвижного транспорта не ограничивается использованием только маломощных двигателей. Сейчас в качестве тяговых двигателей электроподвижного состава также задействуют асинхронные машины. В статье рассматриваются вопросы повышения качества работы асинхронного двигателя путем уменьшения времени переходных процессов в динамические. Основной задачей исследования является разработка механизма модального регулирования работы асинхронного двигателя, который будет обеспечивать заданные показатели качества системы автоматического управления. Описаны результаты моделирования переходных процессов в каналах потокосцепления и скорости двигателя при использовании модального регулятора. Проведен сравнительный анализ работы асинхронного двигателя с векторной системой регулирования с модальным регулятором и без него. Итоги анализа подтвердили перспективность модального управления при работе асинхронного двигателя. Получены соответствующие графики переходного процесса, подтверждающие достижение заданного времени регулирования при применении модального регулятора. Сформулирован вывод об эффективности предлагаемого метода модального управления асинхронным двигателем.

### Ключевые слова

асинхронный двигатель, векторное управление, модальное управление, характеристический полином, матричное вычисление, математическое моделирование

### Для цитирования

Кулинич Ю.М. Повышение качества регулирования асинхронных двигателей с модальным управлением / Ю.М. Кулинич, Д.А. Стародубцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 124–134. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).124-134.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 27.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 17.10.2023 г.; принята к публикации: 30.10.2023 г.

## Increasing the regulation quality of asynchronous induction motors with modal control

Yu.M. Kulinich, D.A. Starodubtsev✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉dastarodubcev21@gmail.com

### Abstract

To date, the application scope of asynchronous machines is the most extensive. Asynchronous motors are used not only in industry as conveyor drives or supply and exhaust ventilation, but also in railway transport. Low-power asynchronous motors are used in motor-fan and motor-compressor units, as well as for phase splitters' drives. The development trend of electric vehicles is not limited to the use of low-power engines only. Nowadays, asynchronous machines are also used as traction motors for electric rolling stock. The paper discusses issues of improving the quality of regulation of an asynchronous motor by reducing the time of transient processes into dynamic ones. The main objective of the work is to develop a modal control system for the operation of an asynchronous motor, ensuring the specified quality indicators of the automatic control system. A description and simulation results of transient processes in the flux linkage and engine speed channels when using a modal controller are presented. A comparative analysis of the operation of an asynchronous motor with a vector control system using a modal controller and without it was carried out. The results of the analysis confirmed the prospects of using modal control when operating an asynchronous motor. The corresponding graphs of the transient process were obtained, confirming the attainment of the specified control time when using a modal controller. A conclusion has been formulated about the effectiveness of using the method of modal control of an asynchronous motor.

### Keywords

asynchronous motor, vector control, modal control, characteristic polynomial, matrix calculation, mathematical modeling

**For citation**

Kulinich Yu.M., Starodubtsev D.A. Povyshenie kachestva regulirovaniya asinkhronnykh dvigatelei s modal'nym upravleniem [Increasing the regulation quality of asynchronous induction motors with modal control]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 124–134. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).124-134.

**Article Info**

Received: September 27, 2023; Revised: September 28, 2023; Accepted: September 28, 2023.

**Введение**

В последние годы асинхронный привод является самым распространенным приводом, применяемым на железнодорожном транспорте. Это обусловлено его надежностью по сравнению с синхронными приводами и машинами пульсирующего тока, простотой конструкции и высокими энергетическими показателями. Асинхронные двигатели используются на подвижном составе в качестве приводов мотор-вентиляторов, мотор-компрессорных установок, расщипителей фаз, также они нашли применения и в качестве тяговых двигателей [1].

На сети железных дорог РФ приняты в эксплуатацию тепловозы серии 2ТЭ25А, у которых в качестве тягового привода используются асинхронные двигатели. В течение продолжительного времени эксплуатации этих локомотивов асинхронный привод подтвердил заявленные показатели эффективности и надежности. На электроподвижном составе также начали использовать асинхронные двигатели в качестве приводов и самих тяговых двигателей. Так, на полигоне Дальневосточной железной дороги были проведены испытания нового электровоза серии 2ЭС5С с асинхронными тяговыми двигателями, результаты которых подтвердили высокую эффективность использования асинхронного привода.

Несмотря на широкое использование асинхронных двигателей при его положительных качествах он имеет ряд проблем, ограничивающих его потенциал. Основная проблема с обеспечением энергоэффективности асинхронного привода во всем диапазоне токовых нагрузок является пока нерешенной. Работы по повышению эффективности применения асинхронного привода проводятся по двум основным направлениям: применение новых конструктивных решений в разработке тяговых двигателей и конструкции полупроводниковых преобразователей и новых энергосберегающих алгоритмов управления [2–4]. Энергосберегающие алгоритмы строятся на основе теории оптимального управления.

Необходимость в углублении теоретической основы адаптивного и оптимального управления возникла в связи с повышением требований к увеличению точности систем и повышению их быстродействия. Увеличение быстродействия системы без потери в точности и надежности возможно лишь при грамотном подходе к распределению ресурсов управления.

Задача любой системы управления электроприводом заключается в обеспечении заданных значений скорости и величины момента на валу двигателя [5]. Алгоритмы оптимального управления позволяют обеспечить заданный режим работы двигателя за счет сочетаний различных управляющих воздействий. Основными алгоритмами управления в настоящее время являются алгоритмы скалярного (частотного) управления и алгоритмы векторного управления, которые в настоящее время разработаны достаточно полно. В настоящее время на тяговом подвижном составе в качестве системы автоматического регулирования (САР) чаще всего применяют скалярную (частотную) систему.

Оптимальное регулирование систем частотного и векторного управления производится путем сочетания различных управляющих воздействий. При скалярной (частотной) системе управляющим воздействием является частота и амплитуда питающего напряжения. На постоянстве отношения питающего напряжения к частоте строится система оптимального регулирования асинхронного двигателя при частотном управлении. В свою очередь для векторной системы регулирования управляющими воздействиями будут являться проекции тока статора на оси двухфазной вращающейся системы координат  $dq$ .

Задачей алгоритма оптимального управления является обеспечение минимальных значений тока двигателя и электрических потерь путем изменения управляющих воздействий. Как известно в системах векторного управления асинхронным двигателем применение итерационного (пошагового) метода поиска экстремума рабочей функции позволяет на 10–

12 % повысить энергетические показатели привода по сравнению с методом постоянства соотношения напряжения к частоте (частотное регулирование) [6]. Как в системах частотного управления, так и в системах векторного управления асинхронным двигателем достижение оптимума путем изменения управляющих воздействий происходит итеративным (пошаговым) методом.

Поиск оптимальных значений контролируемой величины итеративным методом происходит за счет ступенчатого изменения величины управляющего воздействия на шаг поиска, который может быть неизменяемым или изменяемым во времени. Преимущество итеративного метода заключается в том, что не требуется знание параметров асинхронного привода, так как процесс поиска основан на контроле входного тока и ступенчатого изменения управляющего воздействия. Основным его недостатком является продолжительное время поиска оптимального значения контролируемой величины. Даже при переменном шаге поиска, время выхода поиска будет достаточно продолжительным.

Системы частотного и векторного управления электроприводом по своей структуре являются многоконтурными. Такая система реализуется в соответствии с принципами подчиненного регулирования, что ограничивает ее быстродействие и точность работы в переходных режимах. Проблемы этих ограничений системы регулирования способствовали созданию нового метода, называемого методом модального управления, который работает в замкнутой САР.

Принцип работы системы модального управления заключается во введении в обратную связь структурной схемы САР модального регулятора, главная функция которого – суммирование сигналов обратных связей по вектору состояния системы.

Целью исследования является разработка системы модального управления асинхронным двигателем и сравнительный анализ ее работы с системой векторного регулирования асинхронного привода [7]. Рассмотренная система модального управления асинхронным двигателем исследована методом имитационного моделирования. Моделирование работы системы выполнено в среде проектирования SimInTech [8]. Полученные результаты моделирования описанной системы подтвердили правильность функционирования схемы и свидетельствуют о повышении качества регулирования за счет уменьшения времени выхода на установившийся режим работы двигателя.

### Имитационная модель асинхронного двигателя в системе SimInTech

В качестве объекта регулирования в имитационной модели асинхронного двигателя с модальным регулированием принята математическая модель асинхронного двигателя серии АНЭ-225 мощностью 55 кВт. Посредством дифференциальных уравнений описаны электромагнитные процессы, протекающие в двигателе. Структурная схема модели асинхронного двигателя представлена на рис. 1.

Математическая модель двигателя описана во вращающейся системе координат  $d-q$ , у которой вещественная ось ( $d$ ) совмещена с

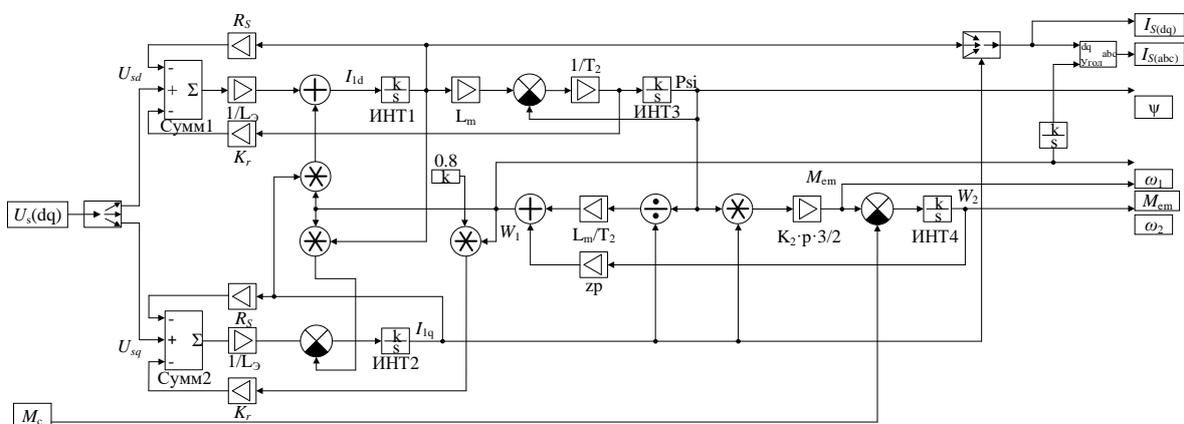


Рис. 1. Структурная схема модели асинхронного двигателя

Fig. 1. Block diagram of the induction motor model

направлением вектора потокосцепления ротора  $\psi_r$  [9]. В этом случае уравнения для нахождения проекций напряжений на оси системы координат  $d$ - $q$  будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} U_{sd} = p[(L_s - L_m K_r)I_{sd} + K_r \psi_r] + \\ + I_{sd} R_s - \omega_e (L_s - L_m K_r)I_{sq}; \\ U_{sq} = \omega_e [(L_s - L_m K_r)I_{sd} + K_r \psi_r] + \\ + I_{sq} R_s + p(L_s - L_m K_r)I_{sq}. \end{cases} \quad (1)$$

Чтобы получить уравнения, позволяющие определить проекции тока статора на вещественную и мнимую оси системы координат  $d$ - $q$  необходимо привести уравнения системы (1) к следующему виду:

$$\begin{cases} pI_{sd} = \frac{1}{L_s - L_m K_r} (U_{sd} - I_{sd} R_s - K_r p \psi_r) + \omega_e I_{sq}; \\ pI_{sq} = \frac{1}{L_s - L_m K_r} (U_{sq} - I_{sq} R_s - \omega_e K_r \psi_r) - \omega_e I_{sd}. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение, позволяющее определить угловую скорость вращения системы координат получим путем совместного решения двух уравнений системы (2):

$$\omega_e = z_p \omega_r + \Delta\omega = z_p \omega_r + \frac{L_m}{\psi_r T_r} I_{sq}. \quad (3)$$

Величина потокосцепления ротора  $\psi_r$  и электромагнитного момента на валу асинхронного двигателя  $M_{em}$  определяется следующими уравнениями:

$$p \psi_r = \frac{1}{T_r} (L_m I_{sd} - \psi_r). \quad (4)$$

$$M_{em} = \frac{3}{2} z_p K_r \psi_r I_{sq}. \quad (5)$$

Уравнения (1)–(5) составляют математическую основу имитационной модели асинхронного двигателя:

$$\begin{cases} pI_{sd} = \frac{1}{L_s - L_m K_r} (U_{sd} - I_{sd} R_s - K_r p \psi_r) + \omega_e I_{sq} \\ pI_{sq} = \frac{1}{L_s - L_m K_r} (U_{sq} - I_{sq} R_s - \omega_e K_r \psi_r) - \omega_e I_{sd} \\ p \psi_r = \frac{1}{T_r} (L_m I_{sd} - \psi_r) \\ \omega_e = z_p \omega_r + \Delta\omega = z_p \omega_r + \frac{L_m}{\psi_r T_r} I_{sq} \\ M_{em} = \frac{3}{2} z_p K_r \psi_r I_{sq}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $U_{sd}$ ,  $U_{sq}$  – соответственно продольная и по-

перечная составляющая напряжения статора;  $R_s$  – активное сопротивление обмотки статора;  $K_r$  – коэффициент электромагнитной связи ротора;  $I_{sd}$ ,  $I_{sq}$  – проекции тока статора на оси координат;  $M_{em}$  – электромагнитный момент.

На вход блока поступают сигналы проекций напряжения статора ( $U_{sd}$  и  $U_{sq}$ ) и значение заданного момента сопротивления на валу двигателя.

Верхняя часть схемы реализована согласно первому уравнению системы (6). Значение  $d$ -составляющей тока статора  $I_{sd}$  определяется в результате интегрирования уравнения с помощью интегратора Инт\_1. На его выходе формируется сигнал  $I_{sd}$ . Нижняя часть схемы реализована аналогично верхней. В ее основу положено второе уравнение системы (6). Значение  $q$ -составляющей тока статора  $I_{sq}$  определяется в результате интегрирования уравнения с помощью интегратора Инт\_2, на выходе которого формируется сигнал  $I_{sq}$ .

Сигнал потокосцепления ротора ( $\psi_r$ ) формируется на выходе третьего интегратора Инт\_3 путем интегрирования третьего уравнения системы (6).

Определение электромагнитного момента происходит на выходе четвертого усилителя ( $K_r \cdot z_p \cdot 3/2$ ). В блоке четвертого усилителя производится умножение произведения сигналов  $\psi_r I_{sq}$ , формирующихся на выходе умножителя Mult.

Сигнал угловой скорости вращения системы координат ( $\omega_e$ ) образуется на выходе сумматора Сумм\_3 в соответствии с четвертым уравнением системы (6). Первое слагаемое суммы образуется на выходе усилителя  $z_p$  в результате умножения сигнала угловой частоты вращения ротора ( $\omega_r$ ) на число пар полюсов  $z_p$ . Второе слагаемое в уравнении вычисляется в результате последовательного выполнения процедур деления сигнала  $q$ -составляющей тока статора ( $I_{sq}$ ) на потокосцепление ротора ( $\psi_r$ ) с помощью делителя и последующего умножения полученного сигнала на величину  $L_m / T_r$ .

На выходе структурной схемы асинхронного двигателя формируются следующие сигналы: сигналы проекций тока статора на оси системы координат  $dq$  ( $I_{sd}$  и  $I_{sq}$ ), потокосцепление ротора ( $\psi_r$ ), электромагнитный момент на валу двигателя ( $M_{em}$ ) и сигналы угловых скоростей вращения системы координат ( $\omega_e$ ) и ротора ( $\omega_r$ ).

### Модель асинхронного двигателя с модальным управлением

Для построения математической модели асинхронного двигателя с модальным управлением преобразуем систему уравнений (6), представленных в форме Коши, в декартовую систему координат  $d$ - $q$ , вращающуюся с угловой скоростью  $\omega_e$ :

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{u_{sd}}{L_{\text{ЭКВ}}} - \frac{1}{T_{\text{э}}} i_{sd} + \frac{K_r \psi_r}{L_{\text{ЭКВ}} T_r}; \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{u_{sq}}{L_{\text{ЭКВ}}} - \frac{1}{T_{\text{э}}} i_{sq} - \frac{K_r z_p}{L_{\text{ЭКВ}}} \omega_r \psi_r; \\ \frac{d\psi_r}{dt} = \frac{1}{T_r} (L_m I_{sd} - \psi_r); \\ \frac{d\omega_e}{dt} = \frac{3}{2J} z_p K_r i_{sq} \psi_r, \end{cases} \quad (7)$$

где  $L_{\text{ЭКВ}}$  – общая индуктивность рассеяния статора;  $K_r$  – коэффициент электромагнитной связи статора и ротора соответственно;  $T_r$  – постоянная времени обмотки ротора;  $J$  – момент инерции, приведенный к валу двигателя;  $T_{\text{э}}$  – эквивалентная электромагнитная постоянная времени цепи статора [10].

Система уравнений (7) образует математическую основу схемы асинхронного двигателя

с модальным управлением (рис. 2).

Как следует из рис. 2, к модели асинхронного двигателя подключены два канала управления, регулирование параметров в которых происходит по величине потокосцепления ротора  $\psi_r$  и угловой скорости вращения ротора  $\omega_r$ .

Принцип модального управления заключается в определении таких параметров модального регулятора (МР), которые обеспечивали бы заданные параметры замкнутой САУ двигателя [11].

МР изображен в виде выделенной пунктиром части схемы и состоит из четырех усилителей К5–К8, двух сумматоров – Сумм\_1, Сумм\_2, а также двух вычитателей – Diff\_1, Diff\_2 (см. рис. 2).

Из этого рисунка также следует, что обратная связь в замкнутой САУ определяется по переменным состояниям  $x(t)$  объекта управления (модального регулятора), а не по выходным координатам системы. Тогда работа системы управления может быть представлена следующим уравнением:

$$u(t) = - \sum_{i=1}^n k_i x_i(t) = -k_1 x_1(t) - k_2 x_2(t) - \dots - k_n x_n(t), \quad (8)$$

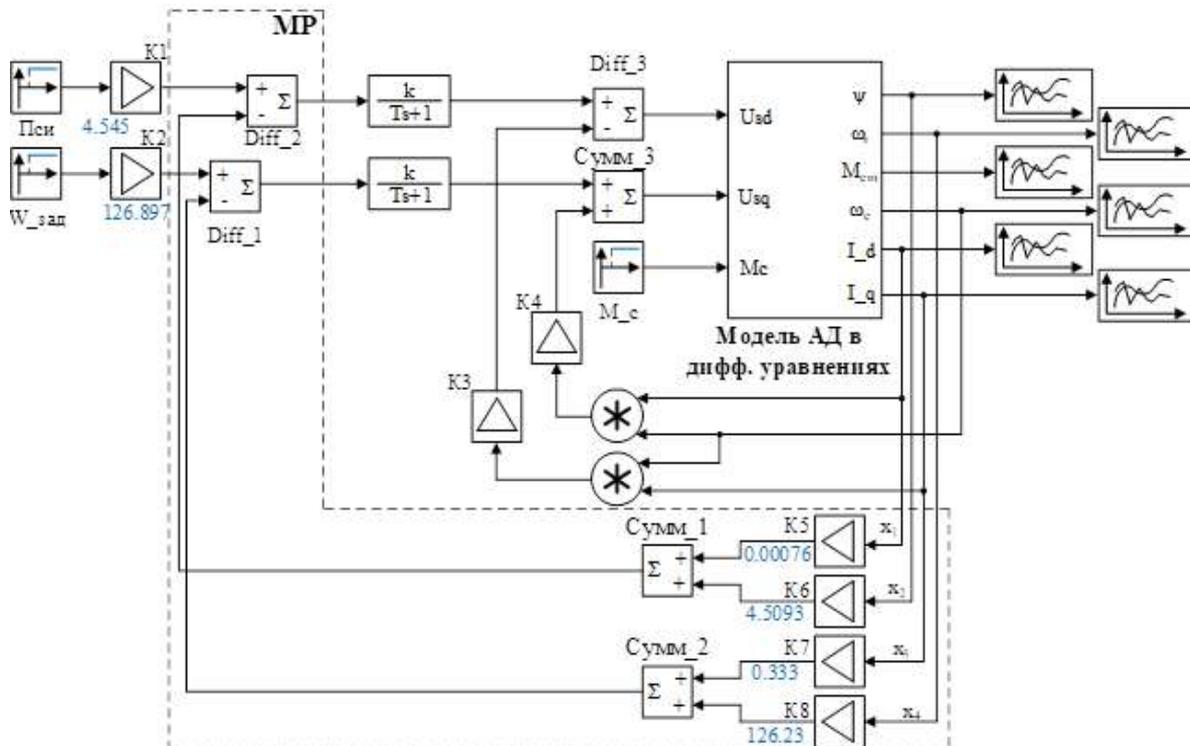


Рис. 2. Схема асинхронного двигателя с модальным регулятором

Fig. 2. Diagram of an asynchronous motor with a modal controller

где  $x_i(t)$  – переменные состояния объекта управления;  $k_i$  – безынерционный коэффициент модального регулятора.

Система управления, синтезируемая в соответствии с уравнением (8), называется модальной системой уравнения, в которой коэффициенты  $k_i$  полностью определяют ее поведение в динамических режимах работы [12].

Порядок расчета коэффициента передачи  $k_i$  модального регулятора проводится согласно задаваемым показателям качества САУ, а именно – желаемому быстродействию системы, которое определяется временем  $t_n$  и характером переходного процесса. Метод модального управления позволяет синтезировать замкнутую САУ с заранее заданными желаемыми показателями качества регулирования [13].

Асинхронный двигатель, представленный в матричной форме [14] описывается в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x, \end{cases}$$

где  $x$  –  $n$ -мерный вектор состояния системы;  $y$  – вектор выходных величин;  $u$  – вектор управляющего воздействия;  $A$  – матрица состояния объекта;  $B$  – матрица управления;  $C$  – матрица выхода.

Для синтеза модального управления асинхронным двигателем необходимо выполнить несколько этапов расчета.

Первый этап заключается в создании матрицы состояния всей системы, матрицы управления и матриц для каждого канала регулирования [15].

Матрица состояния объекта  $A$  (асинхронного двигателя) составляется в соответствии с уравнениями системы (7):

$$A = \begin{vmatrix} -\frac{1}{T_\sigma} & 0 & \frac{K_r}{L_{\text{эКВ}} T_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_\sigma} & -\frac{K_r z_p}{L_{\text{эКВ}}} \omega_r & -\frac{K_r z_p}{L_{\text{эКВ}}} \psi_r \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & 0 \\ 0 & \frac{3z_p K_r}{2J} \psi_r & \frac{3z_p K_r}{2J} i_{sq} & 0 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Матрица управления  $B$  составляется согласно той же системе уравнений (7) и принимает вид:

$$B = \begin{vmatrix} \frac{K_{п1}}{L_{\text{эКВ}}} & 0 \\ 0 & \frac{K_{п2}}{L_{\text{эКВ}}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Матрицы для канала регулирования потокосцепления ротора  $\psi_r$  имеют вид:

$$A_\psi = \begin{vmatrix} -\frac{1}{T_\sigma} & \frac{K_r}{T_r L_{\text{эКВ}}} \\ \frac{L_m}{T_r} & -\frac{1}{T_r} \end{vmatrix}, \quad B_\psi = \begin{vmatrix} \frac{K_{п1}}{L_{\text{эКВ}}} \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Для канала регулирования скорости вращения ротора  $\omega_r$  матрицы принимают следующий вид:

$$A_\omega = \begin{vmatrix} -\frac{1}{T_\sigma} & -\frac{K_r z_p}{L_{\text{эКВ}}} \psi_r \\ \frac{3z_p K_r}{2J} \psi_r & 0 \end{vmatrix}, \quad B_\omega = \begin{vmatrix} \frac{K_{п2}}{L_{\text{эКВ}}} \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Второй этап синтеза системы модального управления заключается в задании желаемого и определении исходных характеристических полиномов каналов регулирования.

Желаемый характеристический полином для каналов регулирования задается по формуле:

$$D(p) = p^n + A_{n-1} \Omega p^{n-1} + \dots + A_1 \Omega^{n-1} p + \Omega^n, \quad (11)$$

где  $\Omega$  – значение среднегеометрического корня;  $A_i$  – коэффициенты характеристического полинома.

Так как в смоделированной системе (см. рис. 2) асинхронный двигатель описывается уравнениями второго порядка ( $n = 2$ ), то выбор степени полиномов для канала потокосцепления и скорости определен тем же порядком. Исходя из этого коэффициенты полинома (11) выбираются согласно желаемому характеру переходного процесса. В контуре регулирования потокосцепления ротора  $\psi_r$  требуется высокое быстродействие системы. Достичь этого позволяет характеристический полином Баттерворта [16], который отличается минимальной продолжительностью переходного процесса.

Для повышения качества регулирования от контура регулирования угловой скорости двигателя  $\omega_r$  требуется отсутствие перерегули-

рования и аperiodический характер переходного процесса. Эти требования обеспечивает характеристический полином Ньютона [17].

Согласно этим требованиям желаемые характеристические полиномы для канала потокосцепления ротора и канала скорости вращения ротора принимают соответствующие каждому полиному коэффициенты [18] и имеют вид:

$$\begin{aligned} D_{\psi}(p) &= p^2 + 1,41 \cdot \Omega \cdot p + \Omega^2; \\ D_{\omega}(p) &= p^2 + 2,0 \cdot \Omega \cdot p + \Omega^2. \end{aligned} \quad (12)$$

На следующем шаге необходимо определить желаемую передаточную функцию для каждого канала регулирования. Для этого значение среднегеометрического корня принимается равное единице. Желаемая передаточная функция определяется согласно соотношению

$$W_{\text{жел}}(p) = \frac{1}{D(p)},$$

Исходя из полученных желаемых характеристических полиномов в уравнениях (12) соответствующие выражения желаемой передаточной функции для каналов регулирования принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} W_{\text{жел}_{\psi}}(p) &= \frac{1}{p^2 + 1,41p + 1}; \\ W_{\text{жел}_{\omega}}(p) &= \frac{1}{p^2 + 2p + 1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Рассчитав по формуле (13) желаемые передаточные функции, строим их графики в системе MatLab. Для этого задаемся единичным возмущающим воздействием. Пример графика переходного процесса  $h(t)$  для канала потокосцепления показан на рис. 3. Применяя графоаналитический метод, определяем время переходного процесса, когда переходная кривая попадет в область 0,01–0,05 от единичного установившегося значения. Для канала потокосцепления время переходного процесса составило 2,94 сек.

Получив значение времени переходного процесса для каждого канала регулирования, задаемся желаемым временем переходного процесса  $t_n$  и корректируем коэффициенты  $\Omega$  в уравнении (12). Корректировка  $\Omega$  проводится согласно формуле

$$\Omega = \frac{t_n^*}{t_n}. \quad (14)$$

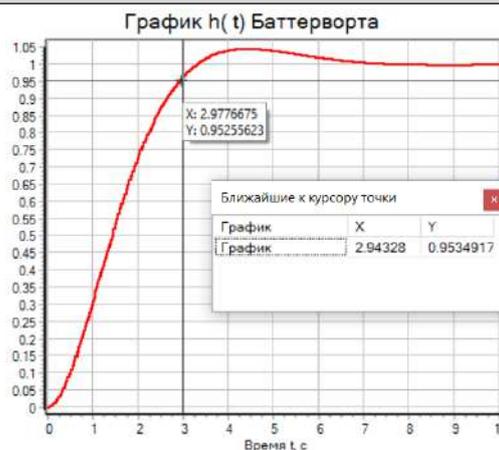


Рис. 3. Результат математического моделирования  
Fig. 3. Result of mathematical modeling

Для канала потокосцепления ротора формула (14) примет численный вид:

$$\Omega_{\psi} = \frac{2,94}{0,015} = 196 \text{ с}^{-1}.$$

Согласно полученному значению желаемый характеристический полином (12) для канала потокосцепления ротора будет равен:

$$D_{\psi}(p) = p^2 + 277,18p + 38416.$$

После этого рассчитывается характеристический полином исходной разомкнутой САР по следующему уравнению:

$$d(p) = p^n + d_{n-1}p^{n-1} + d_1p + d_0.$$

Для определения коэффициентов исходного полинома САР необходимо найти собственные значения матрицы  $A$  и определить коэффициенты характеристического полинома. Все эти операции выполняются в программе MatLab. Пример определения коэффициентов исходного полинома САР для канала потокосцепления ротора  $\psi_r$  представлен на рис. 4.

```
>> format long
>> A=[-76.923 907.498; 0.0323 -1.1];
>> e=eig(A);
>> ps=poly(e)

ps =

1.0000000000000000 78.022999999999996 55.303114600000008
```

Рис. 4 Значения коэффициентов  $d_i$  для канала потокосцепления

Fig. 4 Values of coefficients  $d_i$  for the flux linkage channel

На следующем шаге составляем матрицы управляемости в обычной и канонической формах:

$$U = \begin{vmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{vmatrix}; \quad (15)$$

$$U_k = \begin{vmatrix} B_k & A_k B_k & A_k^2 B_k & \dots & A_k^{n-1} B_k \end{vmatrix}.$$

Для составления первой матрицы уравнения (20) используются матрица состояния объекта ( $A$ ) и матрица управления ( $B$ ) из уравнений (9) и (10). Чтобы составить вторую матрицу из уравнения (15) необходимо преобразовать матрицы  $A$  и  $B$  к каноническому виду:

$$A_k = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & -a_3 & \dots & -a_n \end{vmatrix}; \quad B_k = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{vmatrix}.$$

В последней строке матрицы  $A_k$  расположены коэффициенты характеристического уравнения матрицы  $A$ . Они записываются в обратном порядке и с обратным знаком.

Для канала потокосцепления ротора матрицы в канонической форме принимают вид:

$$A_{k_\psi} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & a_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -55,303 & -78,023 \end{vmatrix}; \quad B_{k_\psi} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}.$$

После составления матриц управляемости определяем матрицу преобразования ( $P$ ) путем произведения матрицы управляемости, записанной в каноническом виде, на обратную матрицу управляемости, записанную в обычном виде:

$$P = U_k U^{-1}.$$

Далее сформируем в каноническом виде вектор параметрических отклонений коэффициентов обратных связей желаемого характеристического полинома  $a_i$  и полинома исходной системы  $d_i$ :

$$k = [a_0 - d_0 \quad a_1 - d_1 \quad a_{n-1} - d_{n-1}].$$

Вектор невязок для канала потокосцепления ротора имеет следующий вид:

$$k_\psi = [38 \ 416 - 55,303 \quad 277,18 - 78,023] = [38 \ 360,7 \quad 199,157].$$

Получив значения вектора невязок для каждого канала управления рассчитываем коэффициенты модального регулятора:

$$K = k \cdot P.$$

Согласно описанной методике синтеза системы модального регулирования, выполнен расчет модели асинхронного двигателя (см. рис. 2) и получены следующие значения коэффициентов модального регулятора:

$$\begin{aligned} & \text{– для канала потокосцепления ротора –} \\ & K5(\psi_r) = 0,00076, \end{aligned}$$

$$K6(\psi_r) = 4,5093;$$

– для канала скорости вращения ротора –

$$K7(\omega_r) = 0,333,$$

$$K7(\omega_r) = 126,23.$$

Схема модального управления поддерживает равенство заданных и фактических значений потокосцепления и скорости двигателя, т.е. выполняется условие регулирования  $u_{\text{вых}} = u_{\text{упр}}$ . В этом случае общий коэффициент передачи замкнутой схемы модального регулирования равен

$$k_y \cdot k_{\text{мп}} = 1.$$

В соответствии с правилами расчета передаточных функций звеньев САП [19], коэффициент усиления корректирующего усилителя вычисляется по формуле:

$$k_y = \frac{1}{k_{\text{мп}}} = \frac{1 + K_{\text{п}} k_2 (k_{2_{\text{oc}}} + k_1 k_{1_{\text{oc}}})}{K_{\text{п}} k_1 k_2}.$$

Рассчитанные в соответствии с полученным выражением значения коэффициентов усиления усилителей составили:  $K1 = 4,545$  и  $K2 = 126,897$  (см. рис. 2).

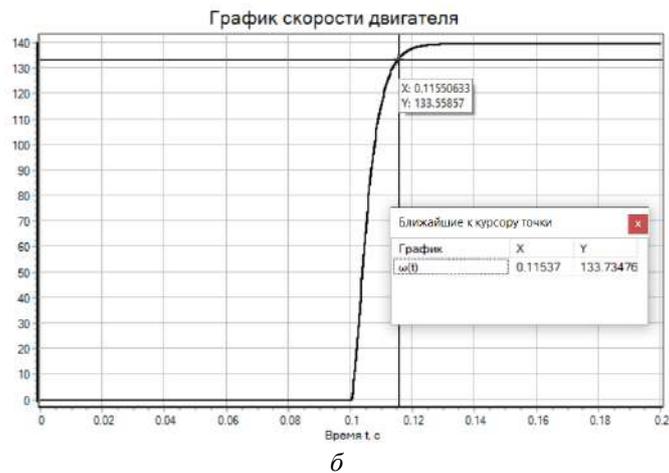
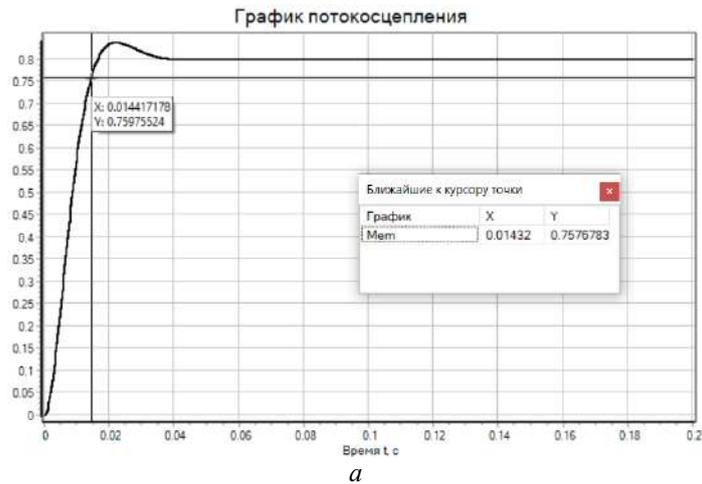
## Результаты моделирования

Промоделировав работу модальной системы управления асинхронным двигателем (см. рис. 2) при заданных значениях потокосцепления ротора  $\psi_{\text{зад.}} = 0,8$  Вб и скорости двигателя  $\omega_{\text{зад.}} = 140$  рад/сек получим зависимости потокосцепления и скорости вращения двигателя, представленные на рис. 5.

Из графиков (см. рис. 5) следует, что время выхода на установившийся режим работы для канала потокосцепления составило 0,0143 сек, для канала скорости – 0,0154 сек.

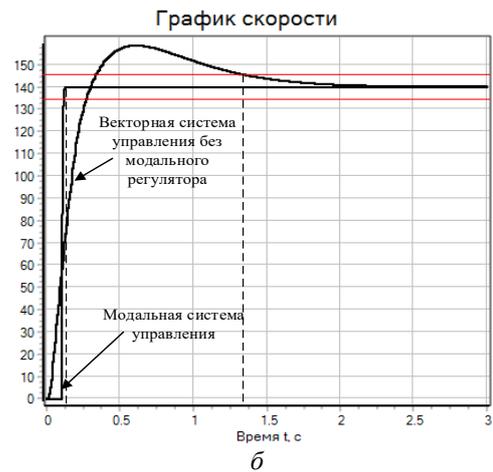
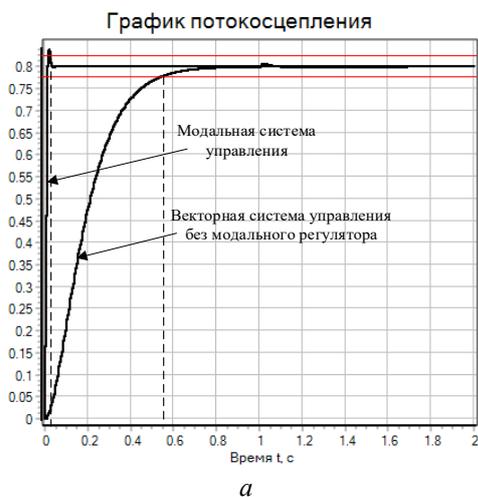
Для подтверждения обоснованности применения метода модального регулирования полученные результаты моделирования сравним с результатами моделирования схемы асинхронного двигателя с векторной системой регулирования без модального регулятора.

Из графиков, представленных на рис. 6 видно, что время достижения установившегося режима для канала потокосцепления системы без модального регулятора составило 0,54 сек, а для канала скорости – 1,37 сек. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение модального регулятора позволяет намного сократить время выхода на установившийся режим работы двигателя. Кривая потокосцепления при модальной системе



**Fig. 5.** Зависимость потокосцепления ротора (а) и скорости вращения ротора двигателя (б)  
**Fig. 5.** Dependence of the flow coupling of the rotor (а) and the rotation speed of the motor rotor (б)

управления имеет участок незначительного перерегулирования, что компенсируется быстрым действием системы.



**Рис. 6.** Совместный график потокосцепления ротора (а) и скорости двигателя (б) при работе с модальным регулятором и без него  
**Fig. 6.** Joint graph of rotor flow coupling (а) and motor speed (б) when working with and without a modal controller

## Заключение

По итогам проведенных исследований и полученным результатам моделирования (см. рис. 5, 6) можно сказать, что установившиеся значения величин потокосцепления и скорости двигателя достигнуты за заданное время переходного процесса.

Этот результат свидетельствует об эффективности применения модального регулятора при

векторном управлении асинхронным двигателем. Техническая реализация модальной системы управления может осуществляться просто и экономично на базе маломощных преобразовательных устройств, что позволяет применять описанный метод модального управления в различных практических приложениях.

## Список литературы

1. Костенко М.П. Электрические машины. Специальная часть. Л. : Госэнергоиздат, 1949. 708 с.
2. Колпаков А. Перспективы развития электропривода // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 46–48.
3. Branko Blanus. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives // New Trends in Technologies : Devices, Computer, Communication and Industrial Systems. Publ. 2010. P. 341–358. DOI 10.5772/10427.
4. Лазарев Г. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем // Новости электротехники. 2005. № 2 (32). С. 15–20.
5. Филиповский В.М. Системы управления в пространстве состояний. СПб. : СПбПУ, 2022. 75 с.
6. Шонин О.Б., Пронько В.С. Энергосберегающие алгоритмы частотного управления асинхронным приводом с уточнением области минимума потерь на основе методов нечеткой логики // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 270–280.
7. Моделирование векторного управления асинхронным приводом вспомогательных машин электроподвижного состава / Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев, В.К. Духовников и др. // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2022. Т. 81, № 1. С. 23–30.
8. Герман-Галкин С.Г., Карташов Б.А., Литвинов С.Н. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. М. : ДМК Пресс, 2021. 494 с.
9. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens-Zeitschrift. 1971. Vol. 45. P. 757–760.
10. Дорошенко И.В., Погуляев М.Н. Имитационная модель асинхронной машины с фазным ротором в MatLab Simulink // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. 2021. № 2 (85). С. 99–106.
11. Панкратов В.В., Зима Е.А., Нос О.В. Специальные разделы современной теории автоматического управления. Новосибирск : НГТУ, 2007. 218 с.
12. Пахомов А.Н., Федоренко А.А., Чертыков П.Н. Модальное управление асинхронным электроприводом тележки мостового крана с наблюдающим устройством // Журн. Сибир. федерал. ун-та. Сер. Техника и технологии. 2022. Т. 15. № 5. С. 583–592.
13. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford : Oxford University Press, 1998. 729 p.
14. Пахомов А.Н., Коротков М.Ф., Федоренко А.А. Модальное управление электроприводом переменного тока // Вестн. Сибир. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2011. № 3 (36). С. 70–74.
15. Васильев Е.М., Сердечная Е.А., Таволжанский А.В. Синтез высокоточных систем модального управления // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2020. Т. 16. № 5. С. 56–63.
16. Дылевский А.В. Применение многочленов Баттерворта для построения модальных дифференциалов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2020. № 1. С. 28–35.
17. Проектирование регуляторов систем управления / В.В. Григорьев, В.И. Бойков, А.В. Парамонов и др. СПб. : ИТМО, 2021. 94 с.
18. Синтез систем автоматического управления методом модального управления / В.В. Григорьев, Н.В. Журавлёва, Г.В. Лукьянова и др. СПб. : ИТМО, 2007. 143 с.
19. Автоматизация электроподвижного состава / А.Н. Савоськин, А.В. Плакс, Л.А. Баранов и др. М. : Транспорт, 1990. 312 с.

## References

1. Kostenko M.P. Elektricheskie mashiny. Spetsial'naya chast' [Electrical Machines. Special part]. Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1949. 708 p.
2. Kolpakov A. Perspektivy razvitiya elektroprivoda [Electric drive development prospects]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2004, no. 1, pp. 46–48.
3. Branko Blanus. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives. *New Trends in Technologies : Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, 2010, pp. 341–358.
4. Lazarev G. Vysokovol'tnye preobrazovateli dlya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda. Postroenie razlichnykh sistem [High voltage converters for variable-speed drive. Construction of various systems]. *Novosti elektrotehniki* [Electrical engineering news], 2005, no. 2 (32), pp. 15–20.
5. Filipovskii V.M. Sistemy upravleniya v prostranstve sostoyanii [Control systems in state space]. Saint Petersburg: SPPU Publ., 2022. 75 p.

6. Shonin O.B., Pron'ko V.S. Energoberegayushchie algoritmy chastotnogo upravleniya asinhronnym privodom s utochneniem oblasti minimuma poter' na osnove metodov nechetkoi logiki [Energy-saving algorithms for frequency control of an asynchronous drive with refinement of the region of minimum losses based on fuzzy logic methods]. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2016, vol. 218, pp. 270–280.
7. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A., Dukhovnikov V.K., Gulyaev A.V. Modelirovanie vektornogo upravleniya asinhronnym privodom vspomogatel'nykh mashin elektropodvizhnogo sostava [Modeling vector control of the asynchronous drive of electric rolling stock auxiliary machines]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2022, vol. 81, no. 1, pp. 23–30.
8. German-Galkin S.G., Kartashov B.A., Litvinov S.N. Model'noe proektirovanie elektromekhanicheskikh mekhatronnykh modulei dvizheniya v srede SimInTech [Model design of electromechanical mechanisms of mechatronic motion in the SimInTech environment]. Moscow: DMK Press Publ., 2021. 494 p.
9. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen. *Siemens-Zeitschrift*, 1971, vol. 45, pp. 757–760.
10. Doroshchenko I.V., Pogulyaev M.N. Imitatsionnaya model' asinhronnoi mashiny s faznym rotorom v MatLab Simulink [Simulation model of an asynchronous machine with a wound rotor in MatLab Simulink]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* [Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi], 2021, no. 2 (85), pp. 99–106.
11. Pankratov V.V., Zima E.A., Nos O.V. Spetsial'nye razdely sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya [Special sections of modern theory of automatic control]. Novosibirsk: NGTU Publ., 2007. 218 p.
12. Pakhomov A.N., Fedorenko A.A., Chertykov P.N. Modal'noe upravlenie asinhronnym elektroprivodom telezhki mostovogo krana s nablyudayushchim ustroystvom [Modal control of an asynchronous electric drive of an overhead crane trolley with a monitoring device]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology], 2022, vol. 15, no. 5, pp. 583–592.
13. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford : Oxford University Press, 1998. 729 p.
14. Pakhomov A.N., Korotkov M.F., Fedorenko A.A. Modal'noe upravlenie elektroprivodom peremennogo toka [Modal control of an AC electric drive]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev], 2011, no. 3 (36), pp. 70–74.
15. Vasil'ev E.M., Serdechnaya E.A., Tavalzhanskii A.V. Sintez vysokotochnykh sistem modal'nogo upravleniya [Synthesis of high-precision modal control systems]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2020, vol. 16, no. 5, pp. 56–63.
16. Dylevskii A.V. Primenenie mnogochlenov Battervorta dlya postroeniya modal'nykh differentsialov [Application of Butterworth polynomials for constructing modal differentials]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technology], 2020, no. 1, pp. 28–35.
17. Grigor'ev V.V., Boikov V.I., Paramonov A.V., Bystrov S.V. Proektirovanie regulyatorov sistem upravleniya [Design of control system regulators]. Saint Petersburg: ITMO Publ., 2021. 94 p.
18. Grigor'ev V.V., Zhuravleva N.V., Luk'yanova G.V., Sergeev K.A. Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya metodom modal'nogo upravleniya [Synthesis of automatic control systems using the modal control method]. Saint Petersburg: ITMO Publ., 2007. 143 p.
19. Savos'kin A.N., Baranov L.A., Plaks A.V., Feoktistov V.P. Avtomatizatsiya elektropodvizhnogo sostava [Automation of electric rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1990. 312 p.

### Информация об авторах

**Кулинич Юрий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: kulinitsch@rambler.ru.  
**Стародубцев Дмитрий Алексеевич**, аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: dastarodubcev21@gmail.com.

### Information about the authors

**Yurii M. Kulinich**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: kulinitsch@rambler.ru.  
**Dmitrii A. Starodubtsev**, Ph.D. Student of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: dastarodubcev21@gmail.com.

## Оценка эффективности теплоизоляционных материалов с помощью проведения тепловых прогнозных расчетов

Д.А. Ковенькин✉, Д.О. Туманов, Н.Д. Шаванов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉kovenkin\_da@irgups.ru

### Резюме

В статье показаны проблемы, связанные с нарушением технологии укладки пенополистирольных плит при проведении капитальных ремонтов железнодорожных путей. Указано на недостатки, возникающие при новом строительстве и эксплуатации участков пути с теплоизоляционными материалами. Актуальность работы заключается в аргументации замены малоэффективного пенополистирола на экологически безопасные полимерные композиционные материалы с повышенными прочностными характеристиками. Учеными Забайкальского института железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения на основе золошлаковых отходов разработаны материалы – аналоги пенополистирола. Основная цель работы – оценка эффективности предложенных теплоизоляционных материалов с помощью проведения тепловых прогнозных расчетов. Теплотехнические сравнительные расчеты проводились с применением программного комплекса Frost 3D Universal. Прогноз эффективности действия представленных проектных мероприятий осуществлялся сроком на пять лет. Установлено, что температура грунта на границе между основной площадкой земляного полотна и применяемыми в настоящее время теплоизоляторами составляет примерно 0,76 °С на середину декабря пятого года эксплуатации. Однако в случае использования предлагаемых теплоизоляторов при аналогичном сроке эксплуатации температура грунта будет достигать примерно 0,92 °С. В целом это позволяет сказать, что по теплотехническим свойствам теплоизолятор, выполненный на основе золошлаковых отходов, соответствует всем необходимым требованиям. Его применение может быть целесообразно при необходимости полного выведения зоны промерзания (оттаивания) из пучинистых грунтов. Кроме того, это поможет исключить ряд недостатков, обнаруживающихся в процессе работы с существующими теплоизоляторами. Например, при укладке на основную площадку земляного полотна есть возможность его раскатывания.

### Ключевые слова

пенополистирол, морозное пучение, теплоизоляция, золошлаковые отходы, тепловые расчеты, технология укладки

### Для цитирования

Ковенькин Д.А. Оценка эффективности теплоизоляционных материалов с помощью проведения тепловых прогнозных расчетов / Д.А. Ковенькин, Д.О. Туманов, Н.Д. Шаванов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 135–145. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).135-145.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 06.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 20.09.2023 г.; принята к публикации: 22.09.2023 г.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках гранта ОАО «Российские железные дороги» для молодых ученых на проведение научных исследований, направленных на создание новой техники и технологий для применения на железнодорожном транспорте «Разработка полимерных композиционных материалов для теплоизоляции и усиления земляного полотна железнодорожного пути на слабом основании» (договор № 5103671 от 26 декабря 2022 г.).

## Evaluation of the efficiency of thermal insulation materials by conducting thermal forecast calculations

D.A. Koven'kin✉, D.O. Tumanov, N.D. Shavanov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉kovenkin\_da@irgups.ru

### Abstract

The problems associated with the technology violation in laying styrofoam plates during major repairs of railway tracks are shown. The disadvantages are also pointed out that arise during the new construction and operation of track sections with thermal insulation materials. The relevance of the work is in argumentation of the replacement of inefficient polystyrene foam by environmentally friendly polymer composite materials with increased strength characteristics. The scientists of Trans-Baikal Institute of Railway Transport have developed materials based on ash and slag waste that are analogous to expanded polystyrene. Based on the above, the main purpose of this work is to evaluate the effectiveness of the proposed thermal insulation materials by conducting thermal fore-

cast calculations. Thermal engineering comparative calculations were carried out using the Frost 3D Universal software package. The forecast of the effectiveness of the developed project activities was carried out for a period of five years. The following results were obtained: the ground temperature at the boundary between the top of the roadbed and the currently used thermal insulators is approximately 0,76 °C by mid-December of the fifth year of operation; in the same period of operation, the temperature of the soil at the boundary between the top of the roadbed and the proposed thermal insulator is approximately 0,92 °C. In general, this allows us to say that according to the thermal properties of the proposed heat insulator made on the basis of ash and slag waste meets all the necessary requirements. The use of the proposed thermal insulators may be advisable if it is necessary to completely remove the freezing-thawing zone from the heaving soils. In addition, the proposed material makes it possible to eliminate a number of disadvantages of existing heat insulators. For example, when laying on top of the roadbed, it is possible to roll it out.

### Keywords

expanded polystyrene, frost heaving, thermal insulation, ash and slag waste, thermal calculations, laying technology

### For citation

Koven'kin D.A., Tumanov D.O., Shavanov N.D. Otsenka effektivnosti teploizolyatsionnykh materialov s pomoshch'yu provedeniya teplovykh prognoznnykh raschetov [Evaluation of the efficiency of thermal insulation materials by conducting thermal forecast calculations]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 135–145. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).135-145.

### Article Info

Received: September 6, 2023; Revised: September 20, 2023; Accepted: September 22, 2023.

### Acknowledgement

The work was carried out within the framework of the grant of JSC «Russian Railways» for young scientists to conduct scientific research aimed at creating new equipment and technologies for use in railway transport «Development of poly-dimensional composite materials for thermal insulation and reinforcement of the railway trackbed on a weak foundation» (Contract No. 5103671 dated December 26, 2022).

### Введение

Основная площадка земляного полотна является одним из важных элементов железнодорожного пути, определяющих стабильность геометрии рельсовой колеи. Вместе с тем сложные условия работы грунтов основной площадки привели к широкому распространению на сети железных дорог дефектов и деформаций этого элемента, что требует повышенных затрат на содержание пути.

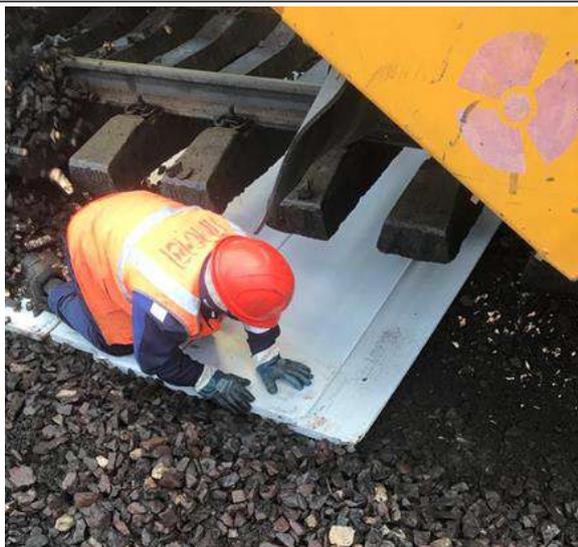
Наиболее характерными для основной площадки являются балластные углубления, связанные с недостаточной прочностью слагающих ее грунтов, что вызывает проникновение мелких частиц грунта в балласт и его интенсивное загрязнение, а также деформации морозного пучения при промерзании и просадки при оттаивании [1–8].

Для усиления основной площадки земляного полотна предусматриваются мероприятия по глубокой очистке балласта, планировке основной площадки, а также устройству подбалластных защитных слоев.

В качестве защитных слоев могут быть использованы подушки из крупно- и среднезернистого песка, песчано-гравийной смеси или щебня фракций менее 25 мм, а также покрытия из пенополистирола или геотекстиля.

Работы по усилению основной площадки предусматриваются на этапе проектирования нового пути или в составе ремонтов пути. Совместно с работой щебнеочистительных машин (ЩОМ), производящих глубокую очистку балласта, выполняют работы по усилению основной площадки без снятия рельсошпальной решетки. В этих условиях наиболее эффективными в качестве защитных слоев становятся покрытия из пенополистирола и геотекстиля, имеющие небольшую толщину. Кроме того, устройство покрытий из пенополистирола одновременно является одним из надежных способов, позволяющих предотвратить деформации морозного пучения. В теории это действительно так, однако, как показывает практика, есть ряд недостатков в технологии укладки пенополистирольных плит. Это все приводит к снижению эффективности в процессе их эксплуатации.

В основном укладка новых плит и замена старых осуществляются при работе ЩОМ. Во время ремонта пути между нерабочей поверхностью баровой цепи и очищенным балластом, возвращенным в путь, образуется рабочее пространство для укладки плит пенополистирола. С учетом того, что машина постоянно находится в движении, есть большой риск нарушения технологии, схемы укладки плит, а также техники безопасности (рис. 1).



**Рис. 1.** Укладка плит из пенополистирола во время работы машины для очистки щебня

**Fig. 1.** Laying styrofoam plates during the operation of a crushed stone cleaning machine

Нарушение технологии укладки плит при работе ЩОМ связано с недостаточной шириной баровой цепи. Так, ширина вырезки балласта составляет от 4,1 (база СЧ-600) до 4,5 м (база ЩОМ), тогда как ширина пенополистирольных плит находится в пределах от 4,5 до 6 м. В связи с этим часто концы плит обрезаются. Или может быть случай, когда завод, производящий плиты пенополистирола, продает плиты длиной только 4,2 м. Тогда их приходится еще и собирать, если требуется шире. Кроме того, поверхность, на которую размещаются плиты, получается не всегда ровная, исправить это практически невозможно. Вследствие чего после засыпки очищенным щебнем происходит раскалывание плит. Также при укладке пенополистирола в несколько слоев часто щебень, прошедший очистку, попадает между плит, что приводит к их расклиниванию и нарушению целостности теплоизолирующего слоя.

При новом строительстве процесс укладки плит усложняет их легкий вес. В случаях даже небольших порывов ветра плиты сдувает и приходится работу проводить повторно. После укладки плит сверху их засыпают балластом, разравнивание которого выполняют бульдозером. Но бульдозер не может постоянно ехать только прямо, ему необходимо делать определенные маневры. В этом случае из-за относительно небольшого слоя еще несформированного балласта происходит раскалывание

плиты пенополистирола. Часть плит удается менять на месте, но некоторые расколотые плиты остаются лежать в пути.

При эксплуатации участков пути с плитами пенополистирола также существует ряд недостатков. Например, если обнаружен дефект рельса на участке с плитами пенополистирола, его вырезают, ставя в это место рубку, вследствие чего образуется стык. Из-за своей структуры пенополистирол не способен гасить вибрацию, возникающую в стыке, и в этом месте наблюдаются постоянные просадки, скорость развития которых намного выше, чем у стыков на участках без теплоизоляции. После производства работ по свариванию стыков просадки на некоторое время пропадают, пока не происходит смятие сварного шва. По наблюдениям даже небольшое смятие способно вызвать резкий рост просадки, которую невозможно предотвратить в рамках текущего содержания пути.

В связи с этим для устранения недостатков, выявленных в процессе укладки и эксплуатации пенополистирольных плит, необходимо создание материалов, обладающих следующими свойствами:

- дешевизна и технологичность;
- экологическая безопасность;
- высокая морозостойкость;
- высокая прочность на сжатие;
- хорошая поглощаемость вибрации;
- низкий процент водопоглощения;
- низкий коэффициент теплопроводности.

С целью обеспечения теплоизоляции и усиления земляного полотна железнодорожного пути актуальным является замена малоэффективного пенополистирола (в сочетании с геотекстилем) на экологически безопасные полимерные композиционные материалы с повышенными прочностными характеристиками.

Учеными Забайкальского института железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения разработаны композиционные материалы на основе крупнотоннажных отходов горноперерабатывающего комплекса и теплоэлектростанций с улучшенными функциональными свойствами, что позволяет использовать их для повышения устойчивости и несущей способности земляного полотна [9–15]. На рис. 2 представлены образцы таких материалов.



**Рис. 2.** Образцы полученных композиционных материалов

**Fig. 2.** Samples of the obtained composite materials

Данные материалы обладают всеми ранее перечисленными свойствами. Приводим основные характеристики полимерных композиционных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами для теплоизоляции и усиления земляного полотна железнодорожного пути:

– удельная эффективная активность естественных радионуклидов дисперсных минеральных добавок в составе композитов – не более 370 Бк/кг;

– предел прочности на сжатие – не менее 6 МПа;

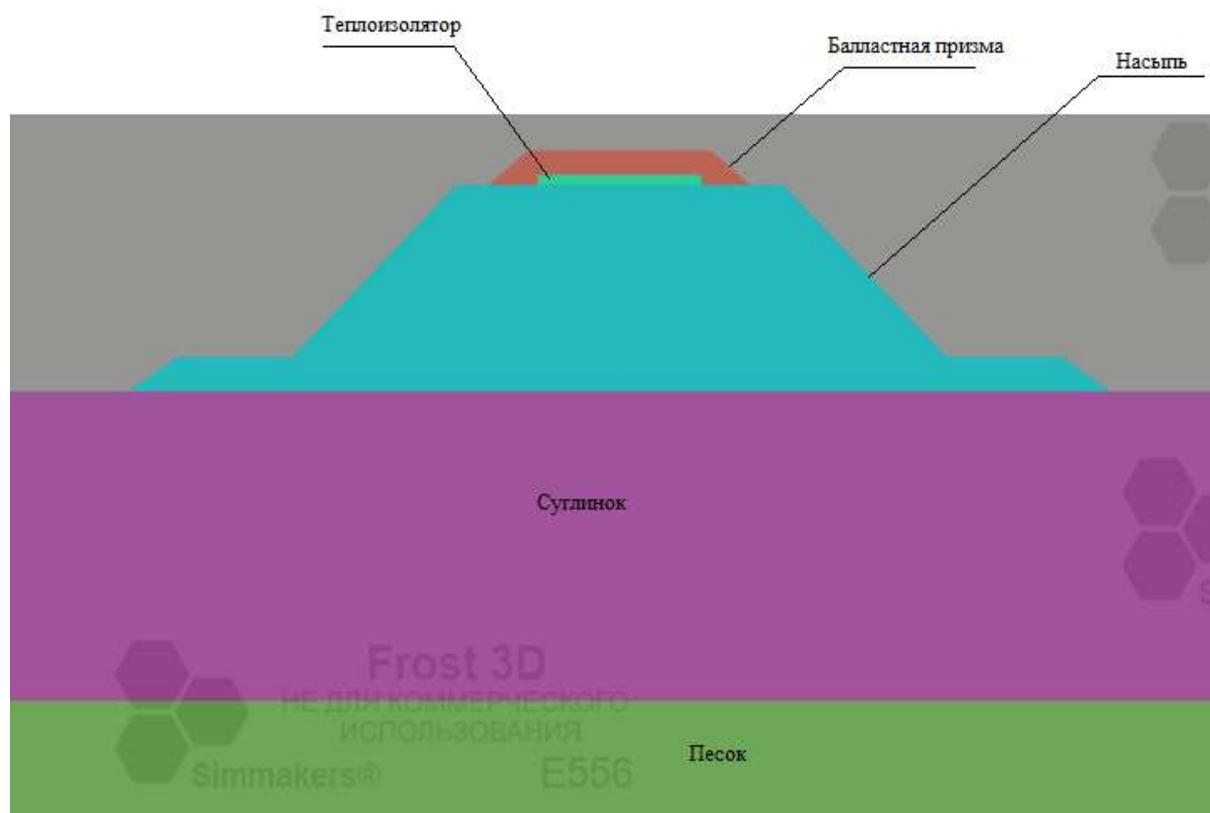
- водопоглощение – не более 0,5 %;
- коэффициент теплопроводности – не более 0,2 Вт/(м °С);
- морозостойкость – не менее 30 циклов замораживания/оттаивания;
- экологическая безопасность, установленная методом биотестирования.

Исходя из изложенного, основная цель данной работы заключается в оценке эффективности предложенных композиционных материалов с помощью проведения тепловых прогнозных расчетов.

### Постановка задачи

Теплотехнические сравнительные расчеты проводились с применением программного комплекса Frost 3D Universal, разработанный ООО «Симмэйкерс».

Рассмотрим моделирование теплового режима железнодорожной насыпи с теплоизоляцией под балластной призмой (рис. 3). Толщина теплоизоляции принята равной 0,3 м. Ширина плиты (размер поперек оси земляного полотна) – 5 м.



**Рис. 3.** Схема поперечного сечения насыпи  
**Fig. 3.** Cross-section diagram of the embankment

Усредненные статистические климатические данные по каждому месяцу (температура, скорость ветра, толщина снегового покрова) представлены в табл. 1. Температурный тренд глобального потепления для данной местности – 0,04 °С в год. Среднезимняя теплопроводность снегового покрова принята равной 0,24

Вт/м °С. Высота снега на откосах принята 1,5 м от высоты в естественных условиях. Высота снега на основной площадке не более 0,1 м в связи с постоянной очисткой железнодорожного пути по условиям эксплуатации. В табл. 2 приведены теплофизические свойства грунтов.

**Таблица 1.** Усредненные статистические климатические данные по каждому месяцу  
**Table1.** Averaged statistical climate data for each month

Параметр Parameter	Месяц Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Средняя температура наружного воздуха, °С Average outside air temperature, °С	-31,1	-23	-12,1	-0,2	8,1	14,8	18,8	16,5	9,5	-0,8	-16,6	-28,6
Скорость ветра, м/с Wind speed, m/sec	1,8	2,1	2,5	3,5	3,4	2,6	2,4	2,3	2,7	2,4	2,3	1,8
Высота снегового покрова на естественной поверхности, м Snow depth on natural surface, m	0,26	0,29	0,27	0,03	0	0	0	0	0	0,02	0,11	0,2
Высота снегового покрова на основной площадке, м Snow depth on the main site, m	0,1	0,1	0,1	0,01	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1
Высота снегового покрова на откосе, м Snow depth on the slope, m	0,44	0,5	0,45	0,05	0	0	0	0	0	0,03	0,18	0,3

**Таблица 2.** Теплофизические свойства грунтов и материалов  
**Table 2.** Thermophysical properties of soils and materials

Наименование параметра материала Material parameter	Материал Material					
	Суглинок Loam	Песок Sand	Грунт основания насыпи Soil of embankment base	Грунт верха насыпи Soil of embankment top	Теплоизолятор	
					Существующий Existing	Предлагаемый Proposed
Объемная теплоемкость талого грунта, МДж / (м <sup>3</sup> ·°С) Volumetric heat capacity of thawed soil, MJ / (m <sup>3</sup> ·°С)	3,15	3,13	2,61	2,35	0,0621	0,0796
Объемная теплоемкость	2,35	2,14	2,42	2,18		

мерзлого грунта, МДж / (м <sup>3</sup> ·°С) Volumetric heat capacity of frozen soil, MJ / (m <sup>3</sup> ·°С)						
Теплопроводность талого грунта, Вт / (м·°С) Thermal conductivity of thawed soil, W / (m·°С)	1,51	1,57	2,09	1,45	0,1395	0,1788
Теплопроводность мерзлого грунта, Вт / (м·°С) Thermal conductivity of frozen soil, W / (m·°С)	1,68	1,79	2,15	1,51		
Суммарная весовая влажность грунта, д.е. Total weight soil moisture, units	0,25	0,38	0,03	0,05	0	0
Плотность сухого грунта, кг/м <sup>3</sup> Density of dry soil, kg/m <sup>3</sup>	1 600	1 220	2 060	1 900	45	90
Температура фазо- вого перехода, °С Phase transition tem- perature, °С	–0,2	–0,28	0	0	0	0

### Определение параметров теплообмена с учетом солнечной радиации

Как известно, температура воздуха, указываемая при инженерно-климатических изысканиях, определяется по ближайшей метеостанции. Замеры температуры на метеостанции происходят в тени, т.е. не учитывается прямое воздействие солнечной радиации. Ее учет особенно актуален при расчете железнодорожных насыпей в случаях ориентации откосов насыпи «север – юг».

Для поверхности грунта воздействие солнечной радиации можно учесть согласно СП 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты» [16] по п. 7 приложения А следующим образом:

$$t_{\text{пр}} = t + \Delta t_r - \Delta t_e,$$

где  $t_{\text{пр}}$  – расчетное значение среднемесячной температуры, °С;  $t$  – среднемесячная температура воздуха, °С;  $\Delta t_r$  и  $\Delta t_e$  – поправки к среднемесячным температурам воздуха за счет солнечной радиации и испарения соответственно, °С –

$$\Delta t_r = r / \alpha,$$

$$\Delta t_e = \Delta t_r k,$$

$$\alpha = 10 \sqrt{v},$$

где  $r$  – среднемесячная сумма радиационного баланса для рассматриваемого элемента поверхности, °С;  $v$  – скорость ветра, м/с;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена на поверхности грунта, Вт / (м<sup>2</sup>·°С);  $k$  – коэффициент, учитывающий характер поверхности, принимаемый в первом приближении, равный 0,8 для естественной поверхности и 0,3 – для оголенной.

Оценку радиационного баланса  $R$  (Вт / м<sup>2</sup>) поверхности насыпи можно произвести согласно СП 498.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории» [17]:

$$R = 0,61 \cdot \Phi - 20,$$

где  $\Phi$  – суммарная солнечная радиация, Вт / м<sup>2</sup>.

Суммарную солнечную радиацию для определенной широты можно определить по СП 25.13330.2020 [18].

Для оценки дополнительного теплопритока на южный откос насыпи и естественную поверхность грунта за счет воздействия солнечной радиации также предоставлены данные по суммарной солнечной радиации (табл. 3).

### Результаты расчета

Теплотехнический расчет проводился с прогнозом эффективности действия разработанных проектных мероприятий сроком на пять лет. Трехмерная модель насыпи показана на рис. 4.

Результаты теплотехнических расчетов, проведенных с применением программного комплекса Frost 3D, представлены в виде изоповерхностей температурного распределения по всему поперечному сечению земляного полотна. На рис. 5 и 6 показано такое распределение. В результате отображается цветовое распределение температур, где синему цвету соот-

ветствует самая низкая температура, а красному – самая высокая.

Теплотехнические сравнительные расчеты с применением программного комплекса Frost 3D Universal, показали следующие результаты:

1. Температура грунта на границе между основной площадкой земляного полотна и применяемыми в настоящее время теплоизоляторами составляет примерно  $0,76\text{ }^{\circ}\text{C}$  на середину декабря пятого года эксплуатации.

2. По краям применяемых теплоизоляторов температура грунта около  $0,015\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

3. В тот же самый срок эксплуатации температура грунта на границе между основной площадкой земляного полотна и предлагаемым теплоизолятором примерно  $0,92\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

4. По краям предлагаемых теплоизоляторов температура грунта около  $0,025\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 3. Значение суммарной солнечной радиации

Table 3. The value of total solar radiation

Параметр Parameter	Месяц Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Суммарная солнечная радиация, Вт/м <sup>2</sup> Total solar radiation, W/m <sup>2</sup>	61,7	103,7	193,0	261,6	329,8	344,5	338,1	279,9	206,4	139,1	72,0	48,2

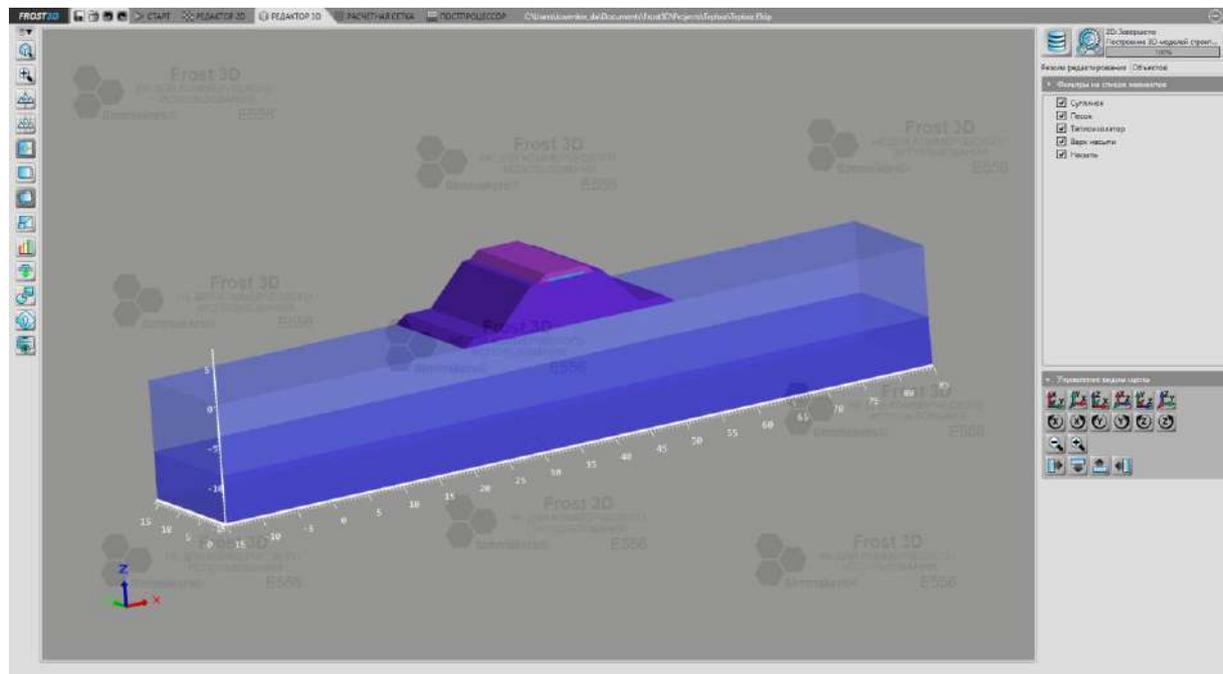
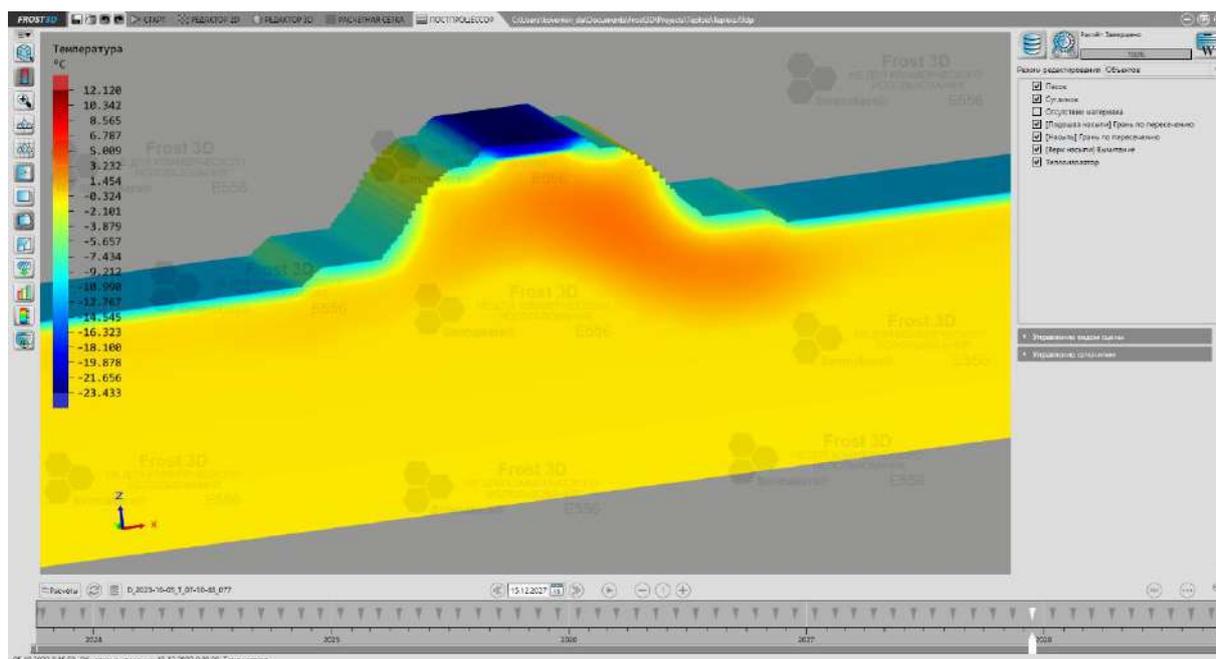
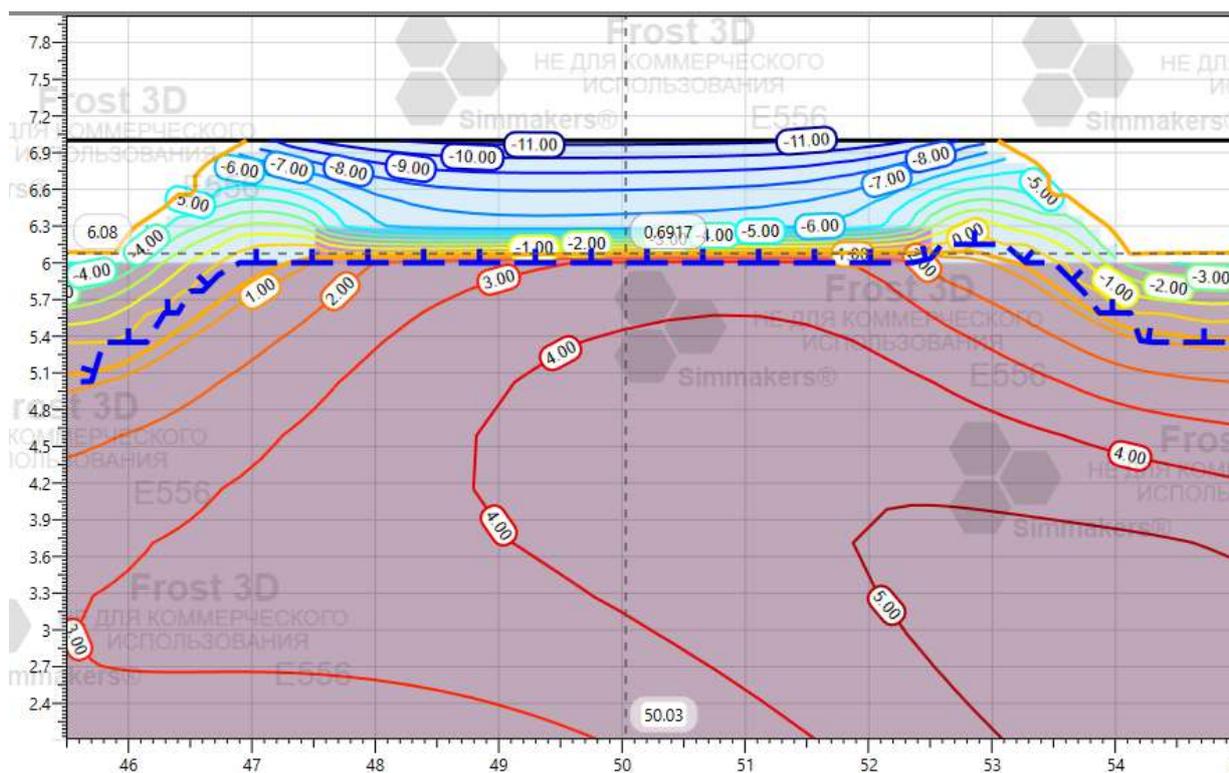


Рис. 4. Трехмерная геометрия земляного полотна  
Fig. 4. Three-dimensional geometry of the roadbed



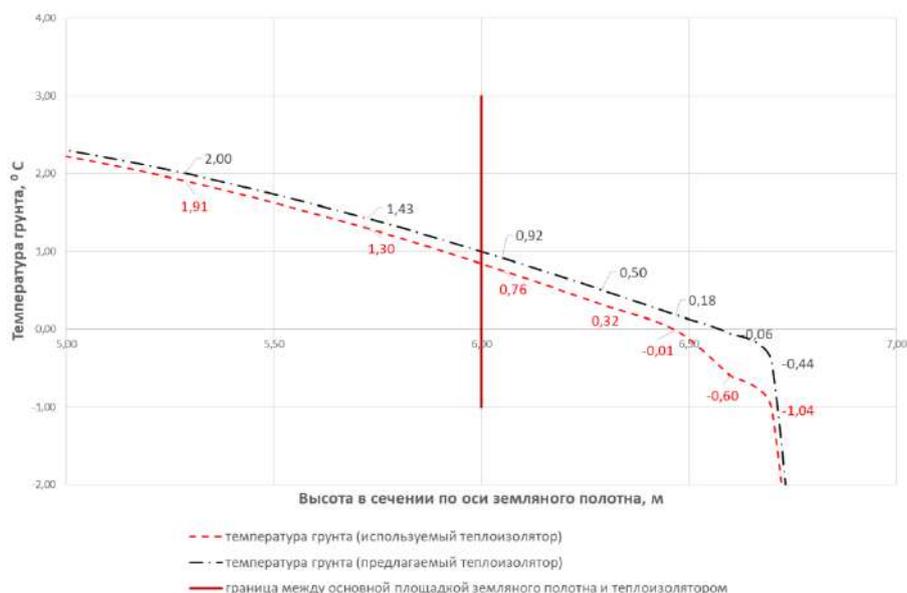
**Рис. 5.** Трехмерная визуализация температуры в сечении XZ расчетной области  
**Fig. 5.** Three-dimensional visualization of temperature in the XZ section of the computational domain



**Рис. 6.** Визуализация температурного поля в сечении расчетной области в виде температур  
**Fig. 6.** Visualization of the temperature field in the cross section of the calculated area in the form of temperatures

5. На глубине 0,5 м под обоими теплоизоляторами температура грунта повышается до 1,7–1,8 °С.

Следовательно, по теплотехническим свойствам предлагаемый композиционный материал на основе отходов производства не хуже существующих (рис. 7).



**Рис. 7.** Температура грунта на границе основной площадки земляного полотна и теплоизолятора с прогнозом до 15 декабря 2027 г.

**Fig. 7.** The temperature of the soil at the boundary of the roadbed site and the heat insulator with the forecast for December 15, 2027

## Заключение

Исходя из изложенного, основная цель данной работы, заключающаяся в оценке эффективности предложенных композиционных материалов с помощью проведения тепловых прогнозных расчетов, достигнута.

Применение предлагаемых композитов может быть целесообразно при необходимости полного выведения зоны промерзания (оттаивания) из пучинистых грунтов.

Кроме того, использование предлагаемого материала позволяет исключить ряд недостатков, возникающих в процессе работы с существующими теплоизоляционными материалами. Например, при укладке на основную площадку земляного полотна есть возможность его раскатывания. Над данной технологией еще нужно работать, что является целью будущих исследований.

## Список литературы

1. Кондратьев В.Г. Активные способы укрепления основания земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Чита : Забтранс, 2001. 100 с.
2. Кондратьев В.Г. Стабилизация земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Чита : Полиграф-Ресурс, 2011. 176 с.
3. Ковенькин Д.А., Валиев Н.А. Защита от деградации многолетнемерзлых грунтов на снегозаносимых участках // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 11. С. 23–26.
4. Принятие решений при выборе конструкций и параметров сезонных охлаждающих устройств / В.А. Подвербный, А.А. Перельгина, Л.Ю. Гагарин и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. С. 147–160.
5. Кирпичников К.А., Дашинимаев З.Б., Баклаженко А.Г. Способ стабилизации земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты с применением инновационных материалов // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 92–96.
6. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Эксперименты по стабилизации земляного полотна на центральном участке Байкало-Амурской магистрали с помощью солнцезащитных навесов // Инженерная геология. 2015. № 4. С. 56–63.
7. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Результаты опытно-экспериментальных работ по охлаждению многолетнемерзлых грунтов в основании железнодорожного пути на центральном участке БАМ // Материалы Пятой конференции геокриологов России. М, 2016. Т. 1. С. 168–175.
8. Валиев Н.А. Термокомплекс, защита от деградации оснований земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы десятой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2019. Т. 1. С. 538–541.
9. Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive / N. Konovalova, P. Pankov, D. Bespolitov et al. // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. DOI 10.1016/j.cscm.2023.e02318.

10. Structural Formation of Soil Concretes Based on Loam and Fly Ash, Modified with a Stabilizing Polymer Additive / N. Konovalova, P. Pankov, V. Petukhov et al. // *Materials*. 2022. Vol. 15. DOI 10.3390/ma15144893.
11. Overburden Recycling in Manufacture of Composite Materials for Road Construction at Mines / D.V. Bespolitov, N.A. Konovalova, P.P. Pankov et al. // *Journal of Mining Science*. 2023. Vol. 59. No 1. P. 167–175.
12. Повышение реакционной способности золошлаковых отходов с целью их утилизации в дорожном строительстве / Д.В. Бесполитов, П.П. Панков, Н.А. Коновалова и др. // *Молодая наука Сибири*. 2023. № 1 (19). С. 242–247.
13. Оценка пригодности золошлаковых отходов Забайкальского края для производства дорожно-строительных материалов / П.П. Панков, Н.Д. Шаванов, Д.В. Бесполитов и др. // *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27. № 5. С. 15–21.
14. Коновалова Н.А. Научное и практическое обоснование получения экологически безопасных строительных материалов на основе крупнотоннажных отходов производства : дис. ... д-ра. техн. наук. Иркутск, 2022. 373 с.
15. Панков П.П. Разработка экологически безопасных дорожно-строительных материалов на основе крупнотоннажных отходов производства : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2021. 166 с.
16. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования : утв. приказом Минстроя РФ № 82/пр от 04.02.2019 (ред. 09.02.2023). Введ. 2019–08–05. М. : Минстрой России, 2019. 58 с.
17. СП 498.1325800.2020 Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории : утв. приказом Минстроя РФ № 910/пр от 30.12.2020. Введ. 2021–07–01. М. : Минстрой России, 2021. 42 с.
18. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах : утв. приказом Минстроя РФ № 915/пр от 30.12.2020. Введ. 2021–07–01. М. : Минстрой России, 2020. 140 с.

### References

1. Kondrat'ev V.G. Aktivnye sposoby ukrepleniya osnovaniya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh [Active methods of strengthening the foundation of the roadbed on permafrost soils]. Chita: Zabtrans Publ., 2001. 100 p.
2. Kondrat'ev V.G. Stabilizatsiya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh [Stabilization of the roadbed on permafrost soils]. Chita: Poligraf-Resurs Publ., 2011. 176 p.
3. Koven'kin D.A., Valiev N.A. Zashchita ot degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov na snegozanosimykh uchastkakh [Protection from degradation of permafrost soils on snow-bearing areas]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2021, no. 11, pp. 23–26.
4. Podverbnyi V.A., Pereylygina A.A., Gagarin L.Yu., Ural'skii D.A. Prinyatie reshenii pri vybore konstruktssii i parametrov sezonnykh okhlazhdayushchikh ustroystv [Decision-making when choosing designs and parameters of seasonal cooling devices]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2019, pp. 147–160.
5. Kirpichnikov K.A., Dashinimaev Z.B., Baklazhenko A.G. Sposob stabilizatsii zemlyanogo polotna v raionakh rasprostraneniya vechnoi merzloty s primeneniem innovatsionnykh materialov [A method for stabilizing the roadbed in permafrost distribution areas using innovative materials]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t)* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2018, vol. 1, pp. 92–96.
6. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Eksperimenty po stabilizatsii zemlyanogo polotna na tsentral'nom uchastke Baikalo-Amurskoi magistrali s pomoshch'yu solntseosadkozashchitnykh navesov [Experiments on the stabilization of the roadbed on the central section of the Baikal-Amur highway with the help of sunshade canopies]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], 2015, no. 4, pp. 56–63.
7. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Rezul'taty opytno-eksperimental'nykh rabot po okhlazhdeniyu mnogoletnemerzlykh gruntov v osnovanii zheleznodorozhnogo puti na tsentral'nom uchastke BAM [Results of experimental work on the cooling of permafrost soils at the base of the railway track on the central section of the Baikal-Amur magistral]. *Materialy Pyatoi konferentsii geokriologov Rossii* [Materials of the Fifth Conference of geocryologists of Russia]. Moscow, 2016, vol. 1, pp. 168–175.
8. Valiev N.A. Termokompleks, zashchita ot degradatsii osnovanii zemlyanogo polotna na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Thermocomplex, protection from degradation of the foundations of the roadbed on permafrost soils]. *Materialy Desyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the Tenth International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2019, vol. 1, pp. 538–541.
9. Konovalova N., Pankov P., Bespolitov D., Petukhov V., Panarin I., Fomina E., Lushpey V., Fatkulina A., Othman A. Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 19. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523004989?via%3Dihub> (Accessed August 30, 2023).
10. Konovalova N., Pankov P., Petukhov V., Fediuk R., Amran M., Vatin N.I. Structural Formation of Soil Concretes Based on Loam and Fly Ash, Modified with a Stabilizing Polymer Additive. *Materials*, 2022, vol. 15. URL : <https://doi.org/10.3390/ma15144893> (Accessed August 30, 2023).
11. Bespolitov D.V., Konovalova N.A., Pankov P.P., Shavanov N.D. Overburden Recycling in Manufacture of Composite Materials for Road Construction at Mines. *Journal of Mining Science*, 2023, vol. 59, no. 1, pp. 167–175.
12. Bespolitov D.V., Pankov P.P., Konovalova N.A., Goroyan T.A. Povyshenie reaktivnoi sposobnosti zoloshlakovykh otkhodov s tsel'yu ikh utilizatsii v dorozhnom stroitel'stve [Increasing the reactivity of ash and slag waste for the purpose of their utilization in road construction]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no. 1 (19), pp. 242–247.
13. Pankov P.P., Shavanov N.D., Bespolitov D.V., Konovalova N.A. Otsenka prigodnosti zoloshlakovykh otkhodov Za-

baikal'skogo kraya dlya proizvodstva dorozhno-stroitel'nykh materialov [Assessment of the suitability of ash and slag waste of the Trans-Baikal Territory for the production of road-building materials]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2023, vol. 27, no. 5, pp. 15–21.

14. Konovalova N.A. Nauchnoe i prakticheskoe obosnovanie polucheniya ekologicheskii bezopasnykh stroitel'nykh materialov na osnove krupnotonnazhnykh otkhodov proizvodstva [Scientific and practical justification of obtaining environmentally friendly building materials based on large-tonnage production waste]. Doctor's thesis. Irkutsk, 2022. 373 p.

15. Pankov P.P. Razrabotka ekologicheskii bezopasnykh dorozhno-stroitel'nykh materialov na osnove krupnotonnazhnykh otkhodov proizvodstva [Development of environmentally safe road-building materials based on large-tonnage production waste]. Ph.D.'s thesis. Irkutsk, 2021. 166 p.

16. SP 447.1325800.2019 Zheleznnye dorogi v rayonakh vechnoi merzloty. Osnovnye polozheniya proektirovaniya (red. 09.02.2023) [Set of rules 447.1325800.2019 Railways in the permafrost areas. General positions of projecting (ed. February 9, 2023)]. Moscow : Minstroj Publ., 2019. 58 p.

17. SP 498.1325800.2020 Osnovaniya i fundamenti zdaniy i sooruzhenii na mnogoletnemerzlykh gruntakh. Trebovaniya k inzhenernoj podgotovke territorii [Set of rules 498.1325800.2020 Soil bases and foundations of buildings and structures on permafrost soils. Requirements for land development of the area]. Moscow: Minstroj Publ., 2020. 42 p.

18. SP 25.13330.2020 Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntakh, (Set of rules 25.13330.2020 Grounds and foundations on permafrost soils). Moscow: Minstroj Publ., 2020. 140 p.

### Информация об авторах

**Ковенькин Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kovenkin\_da@irgups.ru.

**Туманов Дмитрий Олегович**, аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: tumanov.dmitry2014@yandex.ru.

**Шаванов Николай Дмитриевич**, аспирант кафедры техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: shavanov.nikolay@mail.ru.

### Information about the authors

**Dmitrii A. Koven'kin**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kovenkin\_da@irgups.ru.

**Dmitrii O. Tumanov**, Ph.D. Student of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: tumanov.dmitry2014@yandex.ru.

**Nikolai D. Shavanov**, Ph.D. Student of the Department of Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: shavanov.nikolay@mail.ru.

## **Анализ влияния технического состояния песочных систем локомотивов на количество внеплановых ремонтов тягового подвижного состава и пути совершенствования их конструкции**

**С.В. Трескин**✉, **Е.Ю. Дульский**, **П.Ю. Иванов**, **А.В. Ромашов**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉sergei.tresckin@yandex.ru

### **Резюме**

В статье отмечается важное значение железнодорожного транспорта в экономике Российской Федерации и обеспечении безопасности страны. Рассматривается проблема увеличения производительности железнодорожного транспорта, на решение которой могут повлиять повышение надежности тягового подвижного состава и снижение количества отказов в процессе его работы. Реализация мероприятий, направленных на сокращение числа отказов и времени простоя тягового подвижного состава, окажет благоприятное воздействие на функционирование железнодорожного транспорта путем повышения его производительности. Особенно важно отметить необходимость роста качественных показателей работы тягового подвижного состава. Большое значение среди этих показателей занимает участковая скорость. Она является одним из основополагающих параметров, определяющих перевозочную деятельность железнодорожного транспорта. Нарушения графика движения вызывают временные потери. Такие нарушения достаточно часто вызываются отказами подвижного состава. Качество графика движения характеризуется коэффициентом скорости, который зависит от соотношения участковой, технической и ходовой скоростей, а также от некоторых других факторов, в том числе и времени простоя подвижного состава. В работе приведены статистические данные по количеству «сходов с кольца» локомотивов на ст. Тайшет, рассмотрены типология причин «сходов с кольца» и алгоритм процессов при «сходе с кольца». Кроме того, указана статистика отказов элементов песочной системы электровозов парка Восточно-Сибирской железной дороги. Отмечено, что нерациональная подача песка из песочной системы локомотивов приводит к длительным простоям подвижного состава. Изучены песочные системы электровозов переменного тока парка Восточно-Сибирской железной дороги, их назначение, конструкция и принцип работы на примере песочной системы электровоза 2(3) ЭС5К «Ермак». Приведены способы управления подачей песка в песочной системе локомотивов, выявлены основные направления совершенствования систем пескоподдачи локомотивов и рассмотрены некоторые примеры их реализации. По результатам исследования сделан вывод о необходимости модернизации систем пескоподдачи локомотивов или их замены на альтернативные системы.

### **Ключевые слова**

тяговый подвижной состав, участковая скорость, коэффициент участковой скорости, сход с кольца, коэффициент сцепления, система пескоподдачи, расход песка, форсунка песочницы

### **Для цитирования**

Анализ влияния технического состояния песочных систем локомотивов на количество внеплановых ремонтов тягового подвижного состава и пути совершенствования их конструкции / С.В. Трескин, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.В. Ромашов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 146–158. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).146-158.

### **Информация о статье**

поступила в редакцию: 04.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 11.09.2023 г.; принята к публикации: 12.09.2023 г.

## **Analysis of the influence of the locomotive sand systems' technical condition upon the number of unplanned repairs of traction rolling stock and ways to improve their design**

**S.V. Treskin**✉, **E.Yu. Dul'skii**, **P.Yu. Ivanov**, **A.V. Romashov**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉sergei.tresckin@yandex.ru

### **Abstract**

The article points out the important place of railway transport in the economy and ensuring the security of the Russian Federation. The problem of increasing the productivity of railway transport is considered. One of the solutions to this problem may be the increase in reliability and reduction of the number of traction rolling stock failures. The implementation of measures aimed at reducing the number of failures and downtime of traction rolling stock will have a beneficial effect on the

functioning of railway transport by increasing its productivity. It is especially important to note the need to improve the quality performance of traction rolling stock. Of great importance among the qualitative performance indicators of locomotives is the local speed. This indicator is one of the fundamental parameters that determine the transportation activity of railway transport. Violations of the traffic schedule cause temporary losses. These violations are quite often caused by failures of rolling stock. The quality of the traffic schedule is characterized by a speed coefficient, which depends on the ratio of local, technical and running speeds, as well as on some other factors, including the downtime of the rolling stock. The article presents statistical data on the number of «descents off the circle» of locomotives at the Taishet station. The cause typology of «descents off the circle» and the algorithm of the processes at the «descent off the circle» are given. The statistics of the sand system elements failures in electric locomotives of the East-Siberian railway fleet are indicated. It is noted that the irrational supply of sand from the sand system of locomotives leads to long downtime of rolling stock. The sand systems of AC electric locomotives of the East-Siberian railway fleet are considered. Their purpose is indicated, the design and principle of operation are considered on the example of the sand system of the electric locomotive 2(3) ES5K «Ermak». The methods of controlling the supply of sand in the sand system of locomotives are given. The main directions of improving the sand supply systems of locomotives are identified and some existing examples of their implementation are considered. The conclusion is made about the need to improve the sand supply systems of locomotives or replace them with alternative ones.

### Keywords

traction rolling stock, local speed, the coefficient of local speed, descent off the circle, coefficient of cohesion, sand feeding system, sand consumption, sandbox nozzle

### For citation

Treskin S.V., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Romashov A.V. Analiz vliyaniya tekhnicheskogo sostoyaniya pesochnykh sistem lokomotivov na kolichestvo vneplanovykh remontov tyagovogo podvizhnogo sostava i puti sovershenstvovaniya ikh konstruktсии [Analysis of the influence of the locomotive sand systems' technical condition upon the number of unplanned repairs of traction rolling stock and ways to improve their design]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 146–158. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).146-158.

### Article info

Received: September 4, 2023; Revised: September 11, 2023; Accepted: September 12, 2023.

### Введение

На сегодняшний день железнодорожный транспорт является одним из важнейших компонентов экономической и военной безопасности Российской Федерации. С каждым годом растут требования к надежности этого вида транспорта. Остро стоит и вопрос улучшения систем обслуживания и ремонта в условиях эксплуатации. Существует необходимость повышения производительности железнодорожного транспорта. Возможными решениями перечисленных проблем являются повышение надежности подвижного состава, а также увеличение его тяговых и динамических характеристик. Проведение различных мероприятий по снижению отказов и времени простоя тягового подвижного состава на техническом обслуживании и ремонте будет способствовать росту эффективности функционирования железнодорожного транспорта. На данный момент указанные мероприятия являются достаточно востребованными.

Большое значение стоит придать повышению качественных показателей работы локомотивов. Один из данных показателей – участковая скорость движения поезда.

Участковую скорость относят к ключевым показателям оценки перевозочной деятельности железной дороги. Эта скорость является одним из основополагающих технико-экономических показателей, характеризующих качество организации движения на сети дорог. Данный показатель определяет среднюю скорость движения поездов между станциями смены локомотивных бригад и технического осмотра составов, на которых всеми грузовыми составами предусмотрены остановки. Такие показатели использования подвижного состава, как оборот тягового и нетягового подвижного состава, а также рабочий парк подвижного состава, необходимый для обеспечения заданного объема перевозок, зависят от участковой скорости.

Величина участковой скорости зависит не только от уровня технической и ходовой скоростей, но также и от потерь времени при производстве технических операций по обслуживанию и ремонту, вызванных остановками в пределах гарантийного участка [1, 2].

Временные потери являются следствием нарушения графика движения при его невыполнении отдельными сформированными поездами. Данные потери зависят в первую оче-

редь от технического состояния тягового и нетягового подвижного состава. Важный показатель, определяющий качество составленного графика движения, – коэффициент скорости, выражающийся в отношении участковой скорости к ходовой скорости или к технической скорости:

$$\beta_x = v_y / v_x, \beta_T = v_y / v_T,$$

где  $v_y$  – участковая скорость, км/ч;  $v_x$  – ходовая скорость, км/ч;  $v_T$  – техническая скорость, км/ч.

Более обширным образом качество построения графика движения характеризуется коэффициентом  $\beta_x$ , он наглядно отображает влияние на участковую скорость не только общей продолжительности стоянок поездов на промежуточных станциях, но и времени, необходимого для разгона и замедления, также находящегося в зависимости от количества стоянок и остановок поездов.

Целью данной статьи является изучение проблемы влияния технического состояния тягового подвижного состава на его качественные показатели работы. Она рассматривается на примере систем пескоподдачи локомотивов, так как тенденция к увеличению межремонтных пробегов подвижного состава выявила такое явление, как нерациональное использование песка в указанных системах. Сложившаяся ситуация ведет к увеличению времени простоев подвижного состава и, соответственно, к росту экономических потерь ОАО «РЖД». Необходимо рассмотреть возможные пути минимизации или устранения обозначенной проблемы.

### **Анализ статистики отказов оборудования системы пескоподдачи локомотивов**

Еще со времен широкого применения паровозов известны типичные причины отказов систем пескоподдачи. К ним относятся:

- полное или частичное засорение трубопроводов и сопел в форсунках;
- слеживание и комкование песка в бункерах;
- повышенный расход песка из-за конструктивных особенностей систем пескоподдачи и т.д.

Перечисленные причины снижают надежность работы локомотива и эксплуатационные показатели работы системы пескоподдачи [3].

На сегодняшний день проводятся разработки и внедрение новых типов тягового подвижного состава. В конструкцию внедряются такие инновационные решения, как догружающие устройства и наклонные тяги, необходимые для минимизации влияния перераспределения сцепного веса, асинхронный тяговый привод с поосным регулированием и др. Однако по-прежнему существуют такие негативные явления, как боксование и юз колесных пар единиц подвижного состава. Причина этого – высокая степень проскальзывания колес локомотивов. Проскальзывание колес в свою очередь зависит от многих эксплуатационных факторов: степень загрязнения поверхности рельс, условия окружающей среды, вес и скорость движения подвижного состава, профиль и план пути, а также особенности конструкции подвижного состава [4].

С увеличением протяженности гарантийных участков наблюдается значительный рост случаев «схода с кольца» локомотивов по ст. Тайшет, что приводит к снижению технико-экономических показателей, на достижение которых направлен ряд технологических изменений в процессе подготовки и эксплуатации тягового и нетягового подвижного состава по увеличенным гарантийным участкам проследования грузовых поездов (табл. 1).

«Сход с кольца» тягового подвижного состава приводит к вынужденной остановке состава грузового поезда на станции, где его стоянка и повторная обработка не предусмотрены графиком движения, а внеплановое поступление тягового подвижного состава на техническое обслуживание (ТО) ведет к значительным экономическим потерям компании и собственников груза и подвижного состава. На рис. 1 изображена схема процессов при сходе локомотива с кольца.

Сход локомотива с кольца увеличивает риски нарушения графика движения поездов, ведет к возникновению нарушений технологии, очередности предъявления грузовых поездов к обработке, стоянке поездов на перегонах по причине занятости путей и стрелочных переводов.

Для более наглядной иллюстрации на рис. 2 и 3 представлены количество сходов и анализ факторов, которые послужили причиной «схода с кольца» тягового подвижного состава на ст. Тайшет в 2018–2021 гг.

**Таблица 1.** Количество «сходов с кольца» по ст. Тайшет за 2018–2021 гг.  
**Table 1.** The number of «descents off the circle» for the Taishet station for 2018–2021

Месяцы Months	Количество «сходов с кольца» по годам, ед. The number of «descents off the circle» over years, un.					Причины «сходов с кольца» Causes for descents off the circle				
	2018	2019	2020	2021	Итого	Неисправности локомотива Locomotive malfunctions	Техническое обслуживание локомотива Locomotive maintenance	Недостаток песка Lack of sand	Граница оборотного плеча Reverse shoulder border	Текущий ремонт вагонов Current repairs of wagons
Январь January	221	507	293	352	1 373	361	389	173	445	15
Февраль February	123	360	326	359	1 168	294	322	61	484	18
Март March	108	377	295	378	1 158	314	275	71	498	3
Апрель April	176	342	356	427	1 301	344	311	5	647	0
Май May	142	329	270	284	1 025	285	220	0	520	0
Июнь June	102	275	263	237	877	153	127	0	597	0
Июль July	124	303	315	299	1 041	99	102	0	840	0
Август August	151	314	370	315	1 150	124	78	0	941	3
Сентябрь September	126	349	432	346	1 253	148	110	0	966	1
Октябрь October	118	331	394	355	1 198	195	185	8	809	3
Ноябрь November	132	351	378	416	1 277	274	230	41	723	10
Декабрь December	188	462	415	540	1 605	305	325	58	909	8
<i>Итого</i> <i>Total</i>	1 711	4 300	4 107	4 304	14 422	2 895	2 673	416	8 377	61

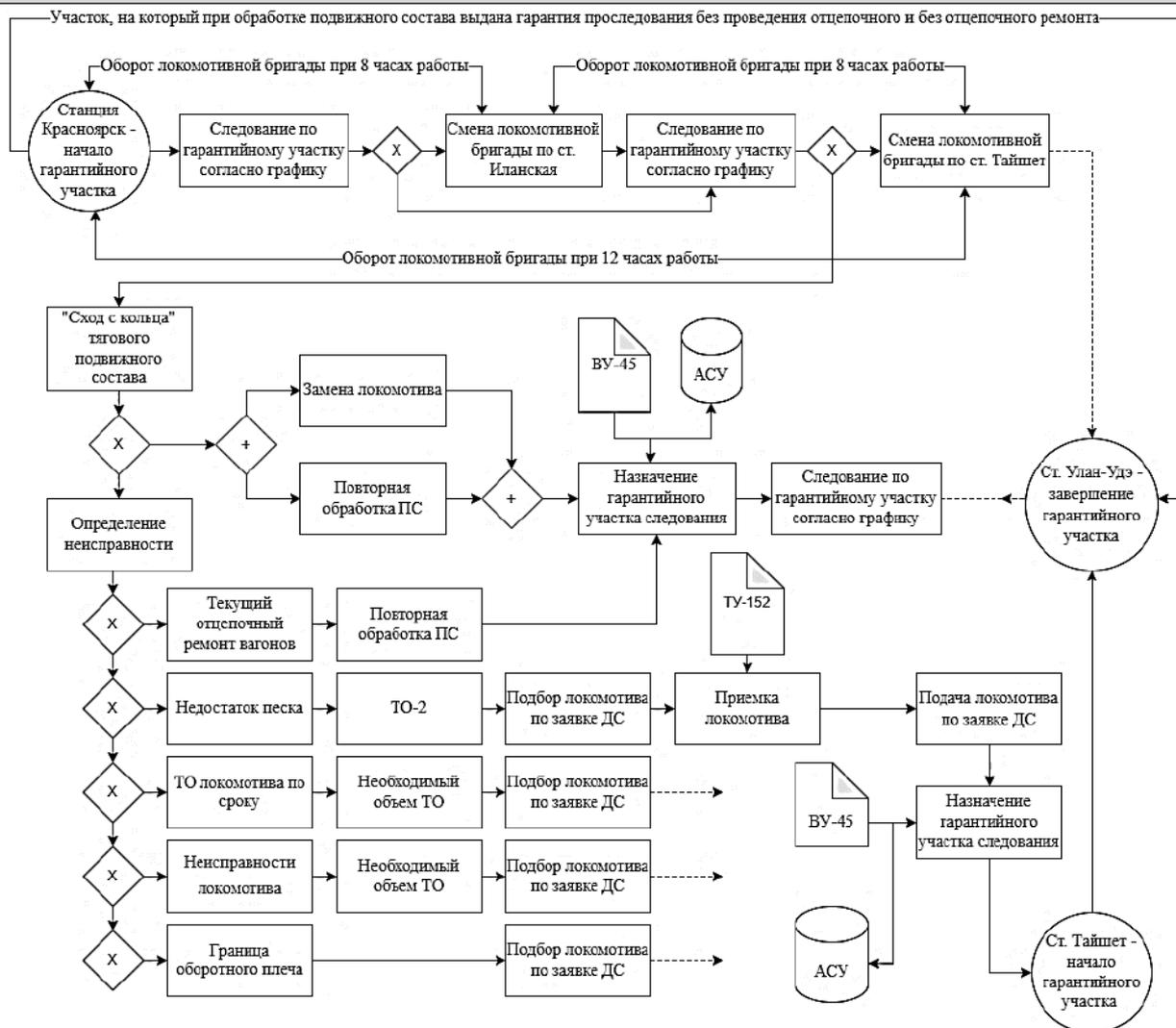


Рис. 1. Схема алгоритма действий при сходе локомотива с кольца  
 Fig. 1. Diagram of the algorithm of actions under a locomotive's descent off the circle

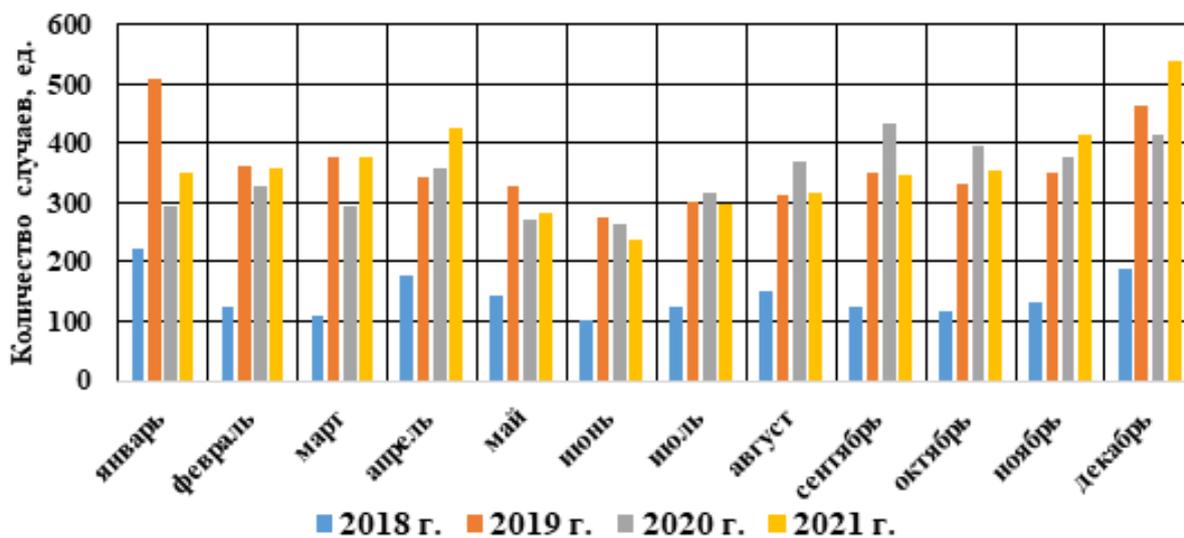


Рис. 2. Количество «сходов с кольца» по ст. Тайшет в 2018–2021 гг.  
 Fig. 2. The number of «descents off the circle» the Taishevet station in 2018–2021

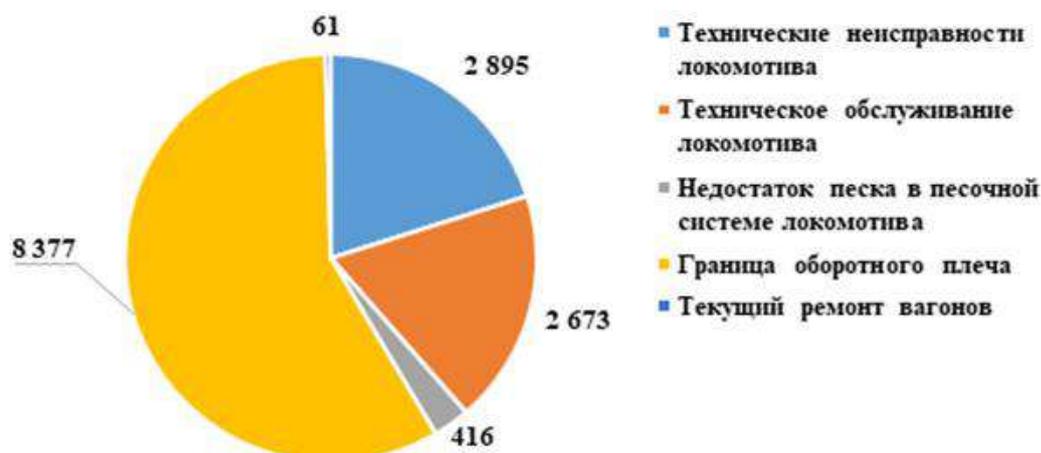


Рис. 3. Причины «сходов с кольца» тягового подвижного состава по станции Тайшет за 2018–2021 гг.

Fig. 3. Reasons for «descents off the circle» of traction rolling stock at Taishet station for 2018–2021

Существуют и другие статистические данные, иллюстрирующие совокупность неисправностей парка электровозов Восточно-Сибирской дирекции тяги. В [5] указывается, что неисправности песочной системы составляют от 10 до 11 % от общего числа отказов парка электровозов. На рис. 4 представлены причины неисправностей парка электровозов в количественном выражении.

Проведя анализ причин «сходов с кольца» тягового подвижного состава по ст. Тайшет, можно выделить, что довольно существенной технической причиной является недостаток песка в песочной системе локомотива. В графике (см. рис. 2) этот фактор занимает довольно небольшой объем, но последствия его влияния достаточно существенные. Значимость этого фактора заключается в том, что нерациональность использования песка может повлечь за собой постановку локомотива в ТО-2 и сход

локомотива с кольца, что принесет компании ОАО «РЖД» значительные убытки и усложнит работы смежных служб в организации деятельности станции и движения грузовых поездов на всем участке. Одна из основных причин данного явления может заключаться в человеческом факторе, а именно – в организации управления машинистом песочной системой локомотива.

#### Назначение, конструкция и принцип работы песочной системы локомотивов

В настоящий момент на Восточно-Сибирской железной дороге активно эксплуатируются грузовые и пассажирские электровозы переменного тока таких серий как ВЛ80, ВЛ85, Э5К, 2(3) ЭС5К, ВЛ65, ЭП1 и ЭП1М. Электровозы указанных серий оснащены системами пескоподдачи [6]. Основные сведения о их песочных системах приведены в табл. 2.

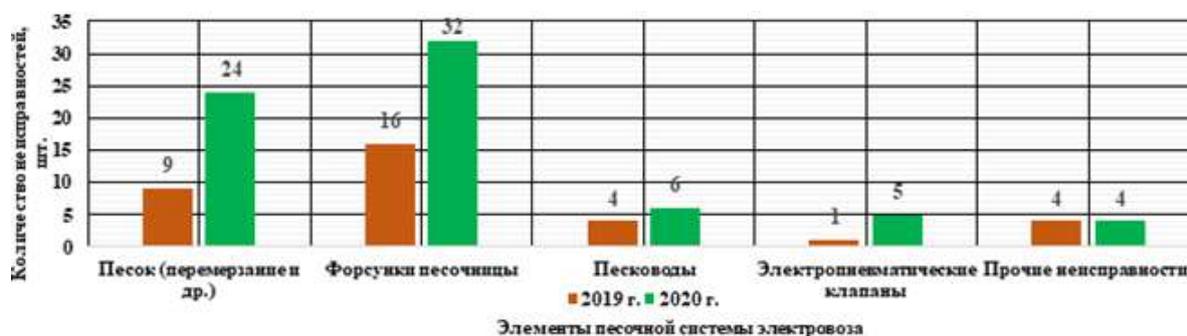


Рис. 4. Причины неисправностей песочной системы электровозов Восточно-Сибирской железной дороги

Fig. 4. Causes of malfunctions of the electric locomotives sand system at the East Siberian Railway

**Таблица 2.** Основные характеристики песочных систем некоторых электровозов парка Восточно-Сибирской железной дороги

**Table 2.** Main characteristics of sand systems of some of the East Siberian Railway's electric locomotive fleet

Серия электровоза Electric locomotive series	Осевая формула Axial formula	Количество песочных бункеров Quantity sand bunkers	Запас песка, кг Sand reserve, kg	Объем песочных бункеров, м <sup>3</sup> Sand bunker volume, m <sup>3</sup>	Тип и количество приводов Type and number of drives	Количество форсунок Number of nozzles	Тип форсунок Type of nozzles	Номера колесных пар по ходу движения, под которые производится подсыпка песка и способ ее осуществления Numbers of wheelsets in the direction of travel, under which sand is added and the method of adding it implementation	Возможность импульсной подачи Pulse submission capability
ВЛ80	2(2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub> )	4 × 260 л 4 × 246 л 4 × 110 л	3 696	2,46 4	4 ЭП 2 П	16	ОН 3-64	к.п. №1П (Р), к.п. № 1, 3, 5 и 7 ЭП (Р и А)	+
ВЛ85	2(2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub> )	12	5 800	4,0	12 ЭП	12	ОН 3-64	к.п. №1 и 7 ЭП (Р), к.п. № 1, 3, 5, 7, 9 и № 11 ЭП (Р и А)	+
Э5К	2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub>	4	1 800	1,2	4 ЭП	8	ОН 3-64	к.п. № 1 и 3 ЭП (Р и А)	+
2ЭС5К	2(2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub> )	8	3 600	2,4	8 ЭП	16	ОН 3-64	к.п. № 1, 3, 5 и 7 ЭП (Р и А)	+
3ЭС5К	3(2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub> )	12	5 400	3,6	12 ЭП	24	ОН 3-64	к.п. № 1, 3, 5, 7, 9 и 11 ЭП (Р и А)	+
ВЛ65	2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub>	4	1 170	0,78	2 ЭП	4	ОН 3-64	к.п. № 1 ЭП (Р и А)	+
ЭП1, ЭП1М	2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub>	4	1 170	0,78	2 ЭП 4 ЭП	4 8	ОН 3-64	к.п. № 1 ЭП (Р и А), к.п. № 1 и 5 ЭП (Р и А)	+

Главная функциональная задача системы пескоподачи – обеспечение повышения коэффициента сцепления колес тележек локомотива с поверхностью рельс. Этот коэффициент является одним из основополагающих факторов, обеспечивающих эффективность перевозок железнодорожным транспортом. Другая немаловажная задача – обеспечение безопасного трогания подвижного состава с места.

Наиболее эффективным решением указанных задач стала подача кварцевого песка на поверхность рельса, под колеса локомотива. Известно достаточно много способов очистки поверхности рельса, которые предназначены для повышения коэффициента трения, напри-

мер, механический, термический, пневмогидравлический, электромагнитный и т.д. [7]. Однако на железнодорожном транспорте наибольшее распространение получил способ подачи песка на поверхность рельса по причине своей простоты и эффективности. В табл. 3 приведены некоторые данные о значениях коэффициента сцепления до и после применения пескоподачи при различных условиях на поверхности рельса [8, 9].

Проанализировав данные табл. 3, можно сделать вывод, что в среднем коэффициент сцепления повышается на 25–30 %.

Конструкцию системы пескоподачи рассмотрим на примере ее реализации на электро-

возе 2(3) ЭС5К «Ермак», который является основным грузовым электровозом Восточного полигона. На рис. 5 изображена пневматическая схема системы пескоподачи электровоза 2(3) ЭС5К «Ермак».

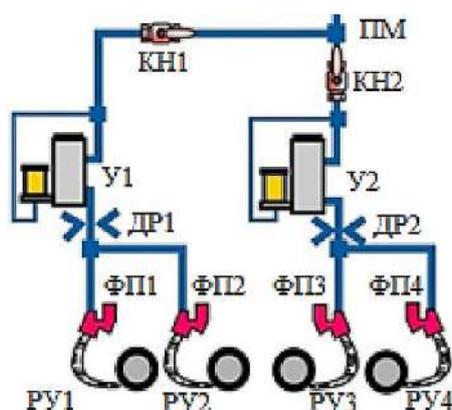
В конструкцию системы пескоподачи входят такие элементы, как бункеры (песочни-

цы), которые выполняют функцию хранения запаса сухого песка, форсунки, необходимые для подачи песковоздушной смеси на поверхность рельса, в точку контакта с колесом, и трубопроводы, объединяющие систему в единое целое и необходимые для транспортировки песка, а также устройства управления системы.

**Таблица 3.** Изменение величины коэффициента сцепления в зависимости от условий на поверхности рельса

**Table 3.** Change in the adhesion coefficient depending on the conditions on the rail surface

Условия на поверхности рельса Conditions on the rail surface	Величина коэффициента сцепления Value of adhesion coefficient		Изменение коэффициента сцепления, % Change in adhesion coefficient
	До пескоподачи Before sand delivery	После пескоподачи After sand delivery	
Чистая и сухая поверхность Clean and dry surface	0,25–0,30	0,35–0,40	25
Чистая и влажная поверхность Clean and damp surface	0,18–0,20	0,22–0,25	20
Влажная и покрытая маслом поверхность Damp and oiled surface	0,15–0,18	0,22–0,25	30
Поверхность, покрытая льдом Ice-covered surface	0,15	0,20	25
Поверхность, покрытая льдом, но с подводом тепла Ice-covered surface with heat input	0,13–0,17	0,26–0,33	50
Поверхность, слегка заснеженная Surface lightly snowy	0,10	0,15	30
Поверхность, после слабого дождя Surface after light rain	0,09–0,16	0,18–0,22	30
Поверхность, покрытая влажными опавшими листьями Surface covered with damp fallen leaves	0,01–0,07	0,12–0,20	65



**Рис. 5.** Пневматическая схема песочной системы секции электровоза 2(3) ЭС5К:

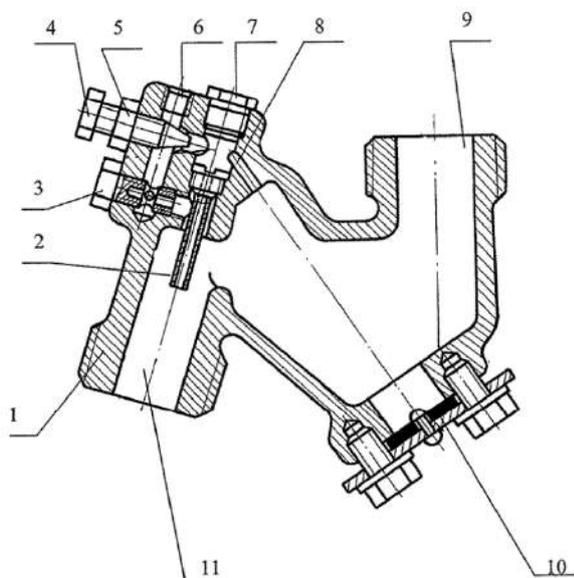
ПМ – питательная магистраль; КН1, 2 – разобщительные краны; У1, 2 – электропневматические клапаны; ДР1, 2 – дроссели; ФП1–4 – форсунки; РУ1–4 – сопла

**Fig. 5.** Pneumatic scheme of sand system of electric locomotive section 2(3) ЭС5К:

ПМ – feed line; КН1, 2 – isolation valves; У1, 2 – electro-pneumatic valves; ДР1, 2 – chokes; ФП1–4 – nozzles; РУ1–4 – injectors

Электропневматические клапаны осуществляют контроль за работой форсунок. Для осуществления гибкой связи используются резиновые рукава. Непосредственно подача песка реализуется через сопла.

Одним из основных элементов системы пескоподачи являются форсунки (рис. 6).



**Рис. 6.** Форсунка песочницы ОНЗ-64:

1 – корпус форсунки; 2 – сопло; 3 – болт;  
4 – регулировочный болт; 5 – контргайка;  
6 – отверстие; 7 – пробка; 8 – разрыхляющий болт;  
9, 11 – горловина; 10 – крышка

**Fig. 6.** Sandbox nozzle ОНЗ-64:

1 – nozzle body; 2 – nozzle; 3 – bolt;  
4 – adjusting bolt; 5 – lock nut; 6 – hole;  
7 – plug; 8 – loosening bolt;  
9, 11 – neck; 10 – cover

Форсунки выполняют функцию дозирования необходимого количества песка. Однако существующие форсунки обладают рядом конструктивных недостатков, снижающих эффективность песочной системы и приводящих к ее выходу из строя [10]. К указанным недостаткам относятся:

1. Выход песка из рукавов системы происходит с низкой скоростью. В этой ситуации возможный боковой ветер приведет к смещению потока песка.

2. Необходимость изменения количества песка в зависимости от времени года, без учета эксплуатационной ситуации.

3. Возможность чрезмерной подачи песковоздушной смеси и потеря уровня регулировки.

4. Закупоривание частицами песка отверстий и каналов в элементах песочной системы.

Для устранения недостатков существующей форсунки песочницы предлагаются ее новые конструкции. Так, в [11] для обеспечения низкой влажности песка и повышения надежности работы и срока службы предлагается конструкция форсунки с измененной геометрией воздухопроводных каналов. Известны и другие конструкции форсунок, направленные на повышение их эксплуатационных показателей [12, 13].

Бункеры системы пескоподачи электровоза 2(3) ЭС5К выполняются в виде емкостей, изготовленных с помощью сварочных соединений и их монтаж производится внутри кузова электровоза. Общий объем бункеров песочной системы для одной секции составляет 1 200 л. Загрузка песка производится через люки, расположенные на крыше. Для просеивания песка в горловинах бункеров имеются сетки.

При помощи сжатого воздуха осуществляется подача песка в системе и управление ее действием, поэтому песочная система подключена с помощью кранов к питательной магистрали.

Под колесные пары нечетных номеров, например, под первую, третью, пятую и седьмую по ходу движения локомотивов выполняется подача песка. В некоторых работах отмечается, что первая по ходу колесная пара локомотива находится в наиболее худших условиях, так как она проходит по наиболее влажной и загрязненной поверхности рельс, в отличие от последующих колесных пар [6, 10]. По этой причине эта колесная пара наиболее подвержена боксованию.

При выполнении экстренного торможения, при возникновении юза и боксования колесной пары также применяется система пескоподачи. В данных случаях производится автоматическая подсыпка песка путем включения электропневматических клапанов сигналом от пневматического выключателя управления. При скорости локомотива менее 10 км/ч подача песка прекращается.

На сегодняшний день существует три типа управления подачей песка в песочной системе:

1. Управление с помощью выключателя на пульте машиниста. Подача песка осуществляется под первые оси секций локомотивов.

2. Управление с помощью нажатия педали или кнопки. В этом случае подача песка

происходит под все нечетные колесные пары по ходу движения.

3. Автоматическое управление с помощью бортовых противобуксовочных систем. Подача песка осуществляется под колеса боксующих осей.

Достаточно широко применяется в эксплуатируемых песочных системах локомотивов импульсная подача песка на рельс. Указанный способ подачи песка предназначен для сокращения его расхода.

### **Пути совершенствования систем пескоподдачи локомотивов**

Песочные системы различных серий отечественных электровозов по принципу действия практически не отличаются друг от друга. Однако решение задачи непрерывной дозированной пескоподдачи под колеса с учетом действующих условий эксплуатации до сих пор не найдено [6]. Существующая норма подачи песка – 1,5 кг/мин. под первую колесную пару электровоза по ходу движения и 0,9 кг/мин. под остальные колесные пары полностью не отвечает решению проблемы повышения коэффициента сцепления и снижения расхода песка.

Стоит отметить, что системы подачи песка под колесные пары локомотива на протяжении многих лет совершенствовались, как и модельный ряд тягового подвижного состава. Активно предлагаются различные методы контроля поступления песка под колесную пару, а также системы контроля остатка песка в бункерах для хранения. Например, разрабатывается специализированное программное обеспечение, позволяющее определять уровень расхода песка и его остаток [14]. Необходимо уделять должное внимание проблеме рациональности применения песка машинистом локомотива.

Системы тягового подвижного состава ведут фиксацию множества параметров в пути следования, например, осуществляют прием и расшифровку сигналов АЛСН (автоматической локомотивной сигнализации) и АЛС-ЕН (автоматической локомотивной сигнализации единой непрерывной), выполняют контроль бдительности машиниста и состояния тормозной системы, ведут обнаружение числа свободных блок-участков при приеме сигналов АЛС-ЕН, а также осуществляют контроль фактической и допустимой скорости движения подвижного состава.

Однако не осуществляется контроль применения машинистом песка с привязкой к участку пути и, как следствие, может сложиться ситуация, которая приведет к бесконтрольному расходованию песка на участках, где его применение иррационально.

Одним из известных способов снижения расхода и потерь песка является его непосредственная подача к точке контакта поверхности катания колеса и рельса путем сокращения расстояния от среза рукава системы пескоподдачи до поверхности головки рельса. Указанное конструктивное решение может сократить потери песка от сдувания при его подаче к поверхности рельса [15].

Другой способ – применение адаптивных систем пескоподдачи [16]. Это изобретение представляет собой алгоритм управления системой пескоподдачи локомотива, который учитывает изменение таких параметров движения подвижного состава, как линейная и угловая скорости движения и т.д., а также состояние пути, его кривизну и уклон, условия окружающей среды. Данные для функционирования алгоритма предполагается собирать штатными датчиками, а последующая их обработка производится микроконтроллером. Результатом применения адаптивного управления песочной системой может быть более экономный расход песка и минимизация боксования и юза.

Альтернативным решением может быть замена песочной системы принципиально другим устройством.

В [17] указывается, что на сегодняшний день существует проблема небольшого пробега локомотивов между экипировками и техническими обслуживаниями ТО-2. Данная проблема препятствует возможности реализации организации ремонта локомотивов по техническому состоянию.

Указанная проблема может быть устранена двумя способами. Первый заключается в модернизации песочного оборудования локомотива, а также в расширении инфраструктуры и увеличении числа пунктов экипировки локомотивов. Второй подразумевает внедрение инновационного оборудования в конструкцию локомотивов, позволяющего сократить использование песка или полностью отказаться от него.

Расширение инфраструктуры и увеличение числа пунктов экипировки потребует значительных финансовых и материальных вло-

жений. Более выгодным является разработка и внедрение новых способов повышения сцепления колеса и рельса, а также оборудования и устройств, позволяющих осуществить это.

Одним из способов увеличения пробега локомотивов между экипировками песком является использование средств активации сцепления колес локомотивов. Проанализировав мировой опыт исследований в рассматриваемой области динамики подвижного состава, можно сделать вывод, что применение средств активации сцепления – одно из эффективных средств увеличения пробега локомотивов между внеплановыми экипировками песком.

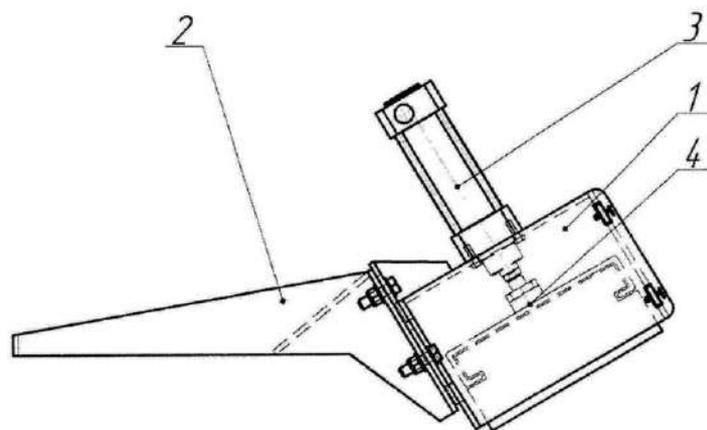
В России также ведутся разработки в этом направлении. Так, по заказу ОАО «РЖД» ученые РГУПС разработали технические требования к устройствам активации трения, а специалистами ООО «ТрансИнТех», «ПК «НЭВЗ» и «ТМХ Инжиниринг» было создано устройство активации трения для электровозов ЗЭС5К.

Созданное устройство представляет собой пневматический привод, который осуществляет функцию прижатия к поверхности катания колеса локомотива активатора трения [18]. Функционирование этого устройства синхронизировано с работой систем безопасности и управления (рис. 7). Активатор повышенного трения представляет собой составную деталь. Основа активатора сделана из алюминиевого сплава. В конструкции активатора предусмотрены равномерно распределенные полости, заполненные веществом, которое активизирует повышенное трение. Вещество является компо-

зитом, состоящим из полиэфирной смолы и специальных добавок на основе порошка из оксида алюминия. На рис. 8 указана схема активатора повышенного трения.

Были проведены поездные испытания разработанного устройства, которые проходили на полигоне Северо-Кавказской дирекции тяги и на участке Большой Луг – Слюдянка Восточного полигона. Результаты испытаний показали, что применение созданного устройства, которое получило название устройство активации трения локомотивов (УАТЛ), позволяет отказаться от применения песка для предотвращения боксования колесных пар, а также стабилизировать коэффициент сцепления, снизить разброс токовых характеристик и обеспечить надежное функционирование локомотива в сложных условиях при тяжеловесном движении. Применение этого устройства позволит снизить время простоя подвижного состава и материальные затраты на экипировку локомотивов, а также повысить производительность локомотивов и пропускную способность пути.

Существует направление, которое заключается в снижении времени простоя локомотива на пункте технического обслуживания локомотивов при его заправке песком. Так, в [19] предлагается автоматизированная система заправки локомотива песком, состоящая из ротационного уровнемера и шиберного затвора с пневматическим приводом. Результатом применения такой системы может стать снижение доли ручного труда и потерь песка при заправке системы пескоподачи локомотива.

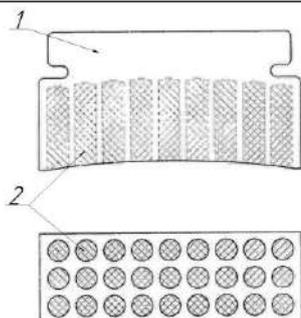


**Рис. 7.** Устройство активации трения и активатор повышенного трения:

1 – корпус, 2 – кронштейн, 3 – пневматический цилиндр; 4 – элемент активатора повышенного трения

**Fig. 7.** Friction activation device and high friction activator:

1 – box, 2 – bracket, 3 – pneumatic cylinder; 4 – element of the high friction activator



**Рис. 8.** Активатор повышенного трения:

1 – корпус из литейного алюминия; 2 – полости, заполненные веществом, повышающим трение

**Fig. 8.** High friction activator:

1 – body made of cast aluminum; 2 – cavities filled with a friction increasing substance

## Заключение

Одним из способов снижения времени всевозможных простоев, связанных с техническим обслуживанием единицы тягового подвижного состава, является совершенствование конструкции систем пескоподачи или их замена на альтернативную систему. Это позволит сократить время, затрачиваемое на обслуживание локомотива в процессе выполнения ТО-2. Данный возможный технический результат подтверждает актуальность решения задачи совершенствования указанных систем.

## Список литературы

1. Белозеров В.Л., Грачёв А.А. «Вечные» вопросы организации движения поездов на двухпутных участках // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2017. Т. 14. № 3. С. 397–405.
2. Экономика предприятий железнодорожного транспорта. Планирование и анализ производственно-хозяйственной деятельности. Т. 1 / под ред. И.А. Костенец, Л.В. Шкуриной. М. : ЦНИП, 2016. 288 с.
3. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. М. : Машгиз, 1962. 220 с.
4. Нехаев В.А., Николаев В.А., Минжасаров М.Х. Совершенствование динамических и тяговых свойств электровозов нового поколения нелинейным рессорным подвешиванием // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 60–66.
5. Корсаков Н.В., Линьков А.О. Разработка устройства дистанционного контроля уровня песка в бункере электровоза // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 17–23.
6. Перспективы развития систем подачи песка электровозов / И.В. Волков, Ю.П. Булавин, И.В. Больших и др. // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2018. № 4. С. 25–29.
7. Колисниченко Е.А. Совершенствование технологии очистки стрелочных переводов от твердых атмосферных осадков инфракрасным излучением : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2019. 142 с.
8. Koffman J. Adhesion and Friction in Rail Traction // Journal of the Institution of Locomotive Engineers. 1948. Vol. 38. № 205. P. 593–672.
9. Moore D.F. Principles and Applications of Tribology. London, N.Y. : Pergamon Press Publ., 1975. 400 p.
10. Коновалов П.Ю., Булавин Ю.П., Волков И.В. Расширение функциональных возможностей форсунки песочницы пневматической системы пескоподачи локомотивов // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 1 (77). С. 75–82.
11. Пат. 2761161 Рос. Федерация. Форсунка песочницы локомотива / А.В. Литвиненко, Д.С. Южалин, Г.Г. Антюхин и др. № 2021113012 ; заявл. 04.05.2021 ; опубл. 06.12.2021, Бюл. № 34. 8 с.
12. Пат. 180931 Рос. Федерация. Форсунка песочницы локомотива / Г.Г. Антюхин, С.В. Аркадсков, В.К. Клевакин и др. № 2017139778 ; заявл. 15.11.2017 ; опубл. 29.06.2018, Бюл. № 19. 6 с.
13. Пат. 2677739 Рос. Федерация. Форсунка песочницы локомотива / Г.Г. Антюхин, С.В. Аркадсков, В.К. Клевакин и др. № 2017139777 ; заявл. 15.11.2017 ; опубл. 21.01.2019, Бюл. № 3. 8 с.
14. Свидетельство № 2021665962. Программа для определения уровня и расхода песка в электровозе / А.О. Линьков, Н.В. Линькова, А.Ю. Портной. № 2021664748 ; заявл. 23.09.2021 ; зарегистр. 05.10.2021.
15. Коновалов П.Ю., Булавин Ю.П., Волков И.В. Влияние формы выходного сечения подсыпного рукава пневматического привода системы пескоподачи на эффективность транспортировки песковоздушной смеси // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 1 (50). С. 42–48.
16. Пат. 2780751 Рос. Федерация. Способ адаптивного управления автоматической подачей песка под колеса локомотива / С.П. Круглов, С.А. Исупов. № 2022104845 ; заявл. 22.02.2022 ; опубл. 30.09.2022, Бюл. № 28. 21 с.
17. Майба И.А. Оценка технической эффективности применения устройств активации трения локомотивов // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 3 (87). С. 42–47.
18. Пат. 2721993 Рос. Федерация. Устройство активации трения и активатор повышенного трения / О.С. Валинский, А.Л. Выщепан, А.М. Лубягов и др. № 2019117405 ; заявл. 04.06.2019 ; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 15. 10 с.
19. Волчек Т.В. Разработка автоматизированной системы пескоподачи для пунктов технического осмотра локомотивов // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 3 (87). С. 64–71.

## References

1. Belozеров V.L., Grachev A.A. «Vechnye» voprosy organizatsii dvizheniya poezdov na dvukhpутnykh uchastkakh [«Eternal» issues of the organization of train traffic on double-track sections]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Saint Petersburg Transport University], 2017, vol. 14, no. 3, pp. 397–405.
2. Ekonomika predpriyatii zheleznodorozhnogo transporta. Planirovanie i analiz proizvodstvenno-hozyaistvennoi

deyatelnosti. T. 1. [Economics of railway transport enterprises. Planning and analysis of production and economic activities. Vol. 1]. Ed. by Kostenets I. A. and Shkurina L.V. Moscow: YsNIP Publ., 2016. 288 p.

3. Kragel'skii I.V., Vinogradova I.E. Koeffitsienty treniya [Friction coefficients]. Moscow: Mashgiz Publ., 1962. 220 p.
4. Nekhaev V.A., Nikolaev V.A., Minzhasarov M. Kh. Sovershenstvovanie dinamicheskikh i tyagovykh svoystv elektrovozov novogo pokoleniya nelineinym resornym podveshivaniem [Improvement of dynamic and traction properties of new generation electric locomotives by nonlinear spring suspension]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2015, no. 3 (46), pp. 60–66.
5. Korsakov N.V., Lin'kov A.O. Razrabotka ustroystva distantsionnogo kontrolya urovnya peska v bunkere elektrovoza [Development of a device for remote monitoring of the sand level in the bunker of an electric locomotive]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 2 (12), pp. 17–23.
6. Volkov I.V., Bulavin Yu.P., Bol'shykh I.V., Konovalov P.Yu. Perspektivy razvitiya sistem podachi peska elektrovozov [Prospects for the development of sand supply systems for electric locomotives]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State University of Railways], 2018, no. 4, pp. 25–29.
7. Kolisnichenko E.A. Sovershenstvovanie tekhnologii ochkistki strelochnykh perevodov ot tverdykh atmosferynykh osadkov infrakrasnym izlucheniem [Improving the technology of cleaning switches from solid atmospheric precipitation by infrared radiation]. Ph.D.'s thesis. Irkutsk, 2019. 142 p.
8. Koffman J. Adhesion and Friction in Rail Traction. *Journal of the Institution of Locomotive Engineers*, 1948, vol. 38, no. 205, pp. 593–672.
9. Moore D.F. Principles and Applications of Tribology. London, N.Y.: Pergamon Press Publ., 1975. 400 p.
10. Konovalov P.Yu., Bulavin Yu.P., Volkov I.V. Rasshirenie funktsional'nykh vozmozhnostei forsunki pesochitsy pnevmaticheskoi sistemy peskopodachi lokomotivov [Expanding the functionality of the sandbox nozzle of the pneumatic sand delivery system of locomotives]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2020, no. 1 (77), pp. 75–82.
11. Litvinenko A.V., Yuzhalin D.S., Antyukhin G.G., Strungar' S.A., Silyuta A.G. Patent RU 2761161 C1, 06.12.2021.
12. Antyukhin G.G., Arkadskov S.V., Klevakin V.K., Chernyshev P.V. Patent RU 180931 U1, 29.06.2018.
13. Antyukhin G.G., Arkadskov S.V., Klevakin V.K., Chernyshev P.V. Patent RU 2677739 C1, 21.01.2019.
14. Lin'kov A.O., Lin'kova N.V., Portnoi A.Yu. Certificate of registration of a computer program 2021665962, 05.10.2021.
15. Konovalov P.Yu., Bulavin Yu.P., Volkov I.V. Vliyanie formy vykhodnogo secheniya podsypnogo rukava pnevmaticheskogo privoda sistemy peskopodachi na effektivnost' trans-portirovki peskovozdushnoi smesi [Influence of the shape of the outlet section of the filling sleeve of the pneumatic drive of the sand supply system on the efficiency of transportation of the sand-air mixture]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State University of Railways], 2020, no. 1 (50), pp. 42–48.
16. Kruglov S.P., Isupov S.A. Patent RU 2780751 C1, 30.09.2022.
17. Maiba I.A. Otsenka tekhnicheskoi effektivnosti primeneniya ustroystv aktivatsii treniya lokomotivov [Evaluation of the technical efficiency of the use of locomotive friction activation devices]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2022, no. 3 (87), pp. 42–47.
18. Valinskii O.S., Vyshchepan A.L., Lubyagov A.M., Maiba I.A. Patent RU 2721993 C1, 25.05.2020.
19. Volchek T.V. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy peskopodachi dlya punktov tekhnicheskogo osmotra lokomotivov [Development of an automated sand feeding system for locomotive technical inspection points]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2022, no. 3 (87), pp. 64–71.

### Информация об авторах

**Трескин Сергей Викторович**, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sergei.tresckin@yandex.ru.

**Дульский Евгений Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: e.dulskiy@mail.ru.

**Иванов Павел Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

**Ромашов Антон Викторович**, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: Patifonik@bk.ru.

### Information about the authors

**Sergei V. Treskin**, Ph.D. Student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sergei.tresckin@yandex.ru.

**Evgenii Yu. Dul'skii**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: e.dulskiy@mail.ru.

**Pavel Yu. Ivanov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

**Anton V. Romashov**, Ph.D. Student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: Patifonik@bk.ru.

## Прогнозирование числа отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде на основе статистической оценки

Т.В. Иванова, В.А. Рудаков, И.В. Ковригина✉

*Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита, Российская Федерация*

✉innabella84@mail.ru

### Резюме

В статье определена функция распределения числа отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде на основе использования статической информации и установлено наиболее вероятное число отказов полувагонов в процессе эксплуатации. Анализируется объем статистических данных о выполнении ремонтов вагонов за продолжительный период времени. Для оценки рассматриваемой выборки предлагается использовать линейные графики зависимостей числа отказов от номера наблюдения. В дальнейшем применяется гистограмма изменения количества отказов, необходимая для идентификации типа распределения исследуемых данных. Для выделения фактического срока службы выборочной совокупности полувагонов предлагается трансформация представления сведений для перехода от распределения Пуассона к нормальному закону. При исследовании статических данных применялось математическое ожидание, которое подтверждает нормальный характер распределения. Приведены аналитические решения по определению числа отказов, полученных на основе оценки статистики посредством известных подходов. Построены графики распределения ремонтов и отказов. Статические данные проанализированы при помощи пакета прикладных программ «Статистика». Найденные решения и сформированная методика могут использоваться при создании специализированного программного комплекса, что позволит выстраивать приближенные прогнозные модели, так как существующими средствами не всегда возможно быстро решить поставленные задачи. Таким образом, результаты исследований могут быть востребованы при осуществлении планирования технических, эксплуатационных, финансовых и стратегических ресурсов вагонного хозяйства и железнодорожной отрасли в целом.

### Ключевые слова

отказ, грузовые вагоны, межремонтный период, надежность, прогнозирование, нормальное распределение

### Для цитирования

Иванова Т.В. Прогнозирование числа отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде на основе статистической оценки / Т.В. Иванова, В.А. Рудаков, И.В. Ковригина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 159–170. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).159-170.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 06.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 12.09.2023 г.; принята к публикации: 14.09.2023 г.

## Forecasting the number of freight wagons failures during the overhaul period based on statistical assessment

T.V. Ivanova, V.A. Rudakov, I.V. Kovrigina✉

*Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, the Russian Federation*

✉innabella84@mail.ru

### Abstract

In the article the distribution function is determined of the number of freight wagons failures during the overhaul period based on the use of static data and the most probable number of gondola wagons failures during operation is stated. The volume of statistical data on the performance of wagon repairs over a long period of time is analyzed. To evaluate the sample under consideration, it is proposed to use linear graphs of the number of failures versus the observation number. Subsequently, a histogram of changes in the number of failures is used, which is necessary to identify the type of distribution of the data under study. To highlight the actual service life of a sample set of gondola wagons a transformation of the data representation is proposed to move from the Poisson distribution to the normal law. To study static data, a mathematical expectation was used, which confirms the normal nature of the distribution. Analytical solutions are presented for determining the number of failures obtained based on the assessment of static data using known approaches. Graphs of distribution of repairs and failures were constructed. Static data was analyzed using the «Statistics» application package. The resulting solutions and the developed methodology can be used to create a specialized software package, which will allow the construction of approximate forecast models, since it is not always possible to quickly solve the assigned problems using existing tools. Thus, the results of these studies can be in demand when planning technical, operational, financial and strategic resources of the carriage industry and the railway industry as a whole.

**Keywords**

failure, freight wagons, overhaul period, reliability, forecasting, normal distribution

**For citation**

Ivanova T.V., Rudakov V.A., Kovrigina I.V. Prognozirovanie chisla otkazov gruzovyh vagonov v mezhremontnom periode na osnove statisticheskoi otsenki [Forecasting the number of freight wagons failures during the overhaul period based on statistical assessment]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 159–170. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).159-170.

**Article info**

Received: September 6, 2023; Revised: September 12, 2023; Accepted: September 14, 2023.

**Введение**

Существующие экономические и политические факторы диктуют новые условия осуществления перевозок, однако, несмотря на это, стратегические цели холдинга ОАО «РЖД» остаются неизменными и направленными, в том числе, на сохранение лидерства в сфере грузовых перевозок с учетом серьезных изменений в структуре погрузки и переориентации больших объемов перевозок для продвижения в восточном направлении [1–5].

Перевозка больших объемов грузов различной номенклатуры, сопряженная с резким изменением направления движения, значительно усиливает нагрузку на объекты железнодорожной инфраструктуры [6–8]. Для оценки новых условий использования пропускных способностей линий и раздельных пунктов необходимо построение достаточно точных прогнозных моделей с учетом долгосрочной перспективы [9].

Увеличение количества грузовых поездов в перевозочном процессе значительно усиливает нагрузку как на элементы верхнего строения пути [10], так и на ходовые части подвижного состава [11], что требует рационального расходования всех видов доступных ресурсов, в том числе связанных с оперированием подвижным составом. В этой связи возникает необходимость создания специализированных программных комплексов, направленных на формирование долгосрочных прогнозов изменения вагонопотоков и объемов погрузки [12]. Однако ресурс технических средств в условиях максимальных динамических нагрузок расходуется значительно быстрее, что провоцирует возникновение отказов различного вида, в том числе связанных с невозможностью эксплуатации грузового подвижного состава.

Отказы технических средств негативно влияют на показатели работы как вагонного хозяйства, так и железнодорожной отрасли в

целом. Поэтому построение моделей безотказной эксплуатации подвижного состава, в частности прогнозирование числа отказов грузовых вагонов в межвалидном периоде, является актуальной задачей [13–16].

Цель данной статьи – определение функции распределения числа отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде для оценки количества отказов грузовых вагонов на основе анализа большого объема статистических данных.

**Материалы и методы**

Использование статистических методов при оценке изменения различных факторов на железнодорожном транспорте представлено достаточно широко, так как позволяет получить усредненную информацию об общем объеме представленных данных, выявить закономерности и зависимости статических величин от различных факторов.

Для прогнозирования числа отказов грузовых вагонов в межвалидном периоде был принят план наблюдений надежности (NMT).

Для NMT продолжительность наблюдений  $T$  при оценке средних показателей надежности определена по формуле [17]

$$T = \frac{\chi \cdot \bar{T}}{N},$$

где  $\chi$  – предполагаемая величина (отношение продолжительности наблюдений оцениваемому показателю надежности);  $\bar{T}$  – средняя наработка на отказ для грузового вагона;  $N$  – наработка между плановыми видами ремонта.

В нашем случае наработка между плановыми ремонтами грузовых вагонов составляет 160 000 км [13–16] и в соответствии с отчетными данными [14] средняя наработка на отказ грузовых вагонов в настоящее время равна 60 205 км, определено достаточное количество объектов наблюдений, чтобы с доверительной

вероятностью  $\gamma = 0,95$  предельная относительная ошибка  $\delta$  не превышала 0,05:

$$N = \frac{\chi \cdot \bar{T}}{T} = \frac{346 \cdot 60205}{160000} = 185.$$

Полученное значение  $N$  округляем до 200. Для получения массива данных по числу отказов выборочной совокупности грузовых вагонов в межвалидном периоде использованы справки о

выполненных ремонтах «2653». Пример типовой справки «2653» приведен в табл. 1.

Исследуемые параметры выборочной совокупности полувагонов представлены в табл. 2. На рис. 1 и 2 представлены диаграммы совокупности случайно отобранных объектов в межвалидных периодах и их фактических сроков службы.

**Таблица 1.** Наполнение типовой справки «2653» о выполненных ремонтах грузового вагона  
**Table 1.** Filling in the standard certificate «2653» of a freight wagon repairs made

№ п/п	Вид ремонта Repair type	Дата ремонта Repair date	Дорога ремонта Repair railway	Депо ремонта Repair depot
1	Кап.	Ноябрь 1994 г.	48 Донецкая	465 Красноармейск-ВЧД
2	Деп.	28 сентября 1996 г.	76 Свердловская	731 Каменск-Уральский-ВЧД
3	Деп.	10 августа 1997 г.	58 Юго-Восточная	1132 Стойленская-ВЧД
4	Деп.	16 августа 1998 г.	1 Октябрьская	319 Бологое-ВЧД
5	Деп. 7600	7 августа 1999 г.	88 Красноярская	443 Аскиз-ВЧД
6	Деп. 7600	25 августа 2000 г.	88 Красноярская	635 Иланская-ВЧД
7	Деп. 7600	21 ноября 2001 г.	80 Южно-Уральская	600 Челябинск-ВЧД
8	Деп. 3108	26 ноября 2002 г.	76 Свердловская	1082 Войновка-ВЧД
9	Тек-2	10 июня 2003 г.	76 Свердловская	579 ВЧДР Свердловск-Сорт.
(102 – Тонкий гребень Thin ridge)				
10	Тек-1	–	48 Донецкая	445 Иловыйск-ВЧД
(102 – Тонкий гребень Thin ridge)				
11	Тек-2	1 сентября 2003 г.	63 Куйбышевская	303 Рузаевка-ВЧД
(102 – Тонкий гребень Thin ridge)				
12	Тек-1	20 сентября 2003 г.	83 Западно-Сибирская	630 Новокузнецк-Сорт.-ВЧД
(249 – Прочие неисправности рамы тележки Other trolley frame faults)				
13	Тек-1	28 октября 2003 г.	83 Западно-Сибирская	1077 Новокузнецк-Север.-ВЧ
(502 – Уширение кузова более 75 мм на одну сторону Body widening more than 75 mm on one side)				
14	Деп. 76003108	30 ноября 2003 г.	88 Красноярская	443 Аскиз-ВЧД
15	Тек-2	–	–	–
(540 – Неисправность запора люка Malfunction of the hatch lock)				
16	Тек-2	25 июля 2004 г.	43 Южная	543 Основа-ВЧД
(109 – Остроконечный накат гребня )				
17	Тек-1	21 октября 2004 г.	58 Юго-Восточная	481 Старый оскол-ВЧД
(540 – Неисправность запора люка)				
18	Тек-2	10 января 2005 г.	40 Одесская	523 Одесса-застава -1-ВЧД
(109 – Остроконечный накат гребня)				
19	Деп. 76003108	18 мая 2005 г.	92 Восточно-Сибирская	653 Улан-Удэ-ВЧД
20	Тек-1	18 декабря 2005 г.	17 Московская	334 Тула-ВЧД
(540 – Неисправность запора люка)				
21	Тек-2	22 июня 2006 г.	32 Юго-Западная	529 Жмеринка-ВЧД
(109 – Остроконечный накат гребня Pointed ridge)				
22	Тек-1	23 июля 2006 г.	83 Западно-Сибирская	621 Ленинск-Кузнецкий-ВЧД
(102 – Тонкий гребень )				
23	Деп.	–	51 Северо-Кавказская	4085 ВЧДЭ-5 Батайск
24	Деп. 76003108	31 октября 2006 г.	28 Северная	735 Сосногорск-ВЧД
25	Тек -1	21 декабря 2006 г.	1 Октябрьская	345 Мурманск-ВЧД
(109 – Остроконечный накат гребня)				
26	Тек -1	11 августа 2007 г.	83 Западно-Сибирская	4089 ВЧДЭ-23 Белово

(102 – Тонкий гребень Thin ridge)				
27	Тек -2	14 октября 2007 г.	92 Восточно-Сибирская	4127 ВЧД-10 Улан-Удэ
(150 – Грение буксы Axle box heating)				
28	Тек -1	7 ноября 2007 г.	83 Западно-Сибирская	4090 ВЧДЭ-27 Тайга
(217 – Трещина или излом надрессорной балки Crack or break in bolster)				
(912 – Претензии к качеству вып.деповского ремонта Claims to the quality of depot repairs)				
29	Деп.	–	17 Московская	4091 ВЧДЭ-18 Тула
30	Деп. 76003108	26 ноября 2007 г.	17 Московская	482 Узловая-ВЧД
31	Тек-2	10 января 2008 г.	94 Забайкальская	759 Борзя-ВЧД
(503 – Обрыв сварного шва стойки Broken pillar weld)				
32	Тек-1	27 марта 2008 г.	61 Приволжская	1078 ВЧДЭ-14 Анисовка
(350 – Обрыв или ослабление болта поддерживающей планки Broken or loosened support bar bolt)				
33	Тек-1	14 июля 2008 г.	80 Южно-Уральская	4104 ВЧДЭ-2 Оренбург
(537 – Неисправности запора двери Door lock faults)				
34	Тек-2	20 января 2009 г.	80 Южно-Уральская	4104 ВЧДЭ-2 Оренбург
(107 – Выщербина обода колеса Wheel rim chip)				
35	Тек-2	22 октября 2009 г.	83 Западно-Сибирская	4087 ВЧДЭ-12 Входная
(912 – Претензии к качеству вып. деповского ремонта Claims to the quality of depot repairs)				
(348 – Неисправности поглощающего аппарата Draft gear malfunctions)				

Таблица 2. Исследуемые параметры выборочной совокупности полувагонов

Table 2. Investigated parameters of a sample set of gondola wagons

Номер вагона Wagon serial number	Число отказов в межремонтном периоде Number of failures during the overhaul period	Фактический срок службы грузовых вагонов на конец наблюдений Actual service life of freight wagons by the end of observations
67455324	4	18
67123899	2	14
60877245	3	17
62345689	0	5
64577899	3	11
66643211	5	22
63233557	4	24
67565252	5	26
63223345	2	22
67887544	3	20
60744998	1	12
61324256	6	11
61531259	4	15
61234227	4	15
61128935	4	16
63128628	3	17
63224512	5	18
61321222	5	22
64528973	5	21
67315295	3	22
64189935	1	16
66571286	2	12
63877666	2	12
.....	.....	.....
64529512	5	18

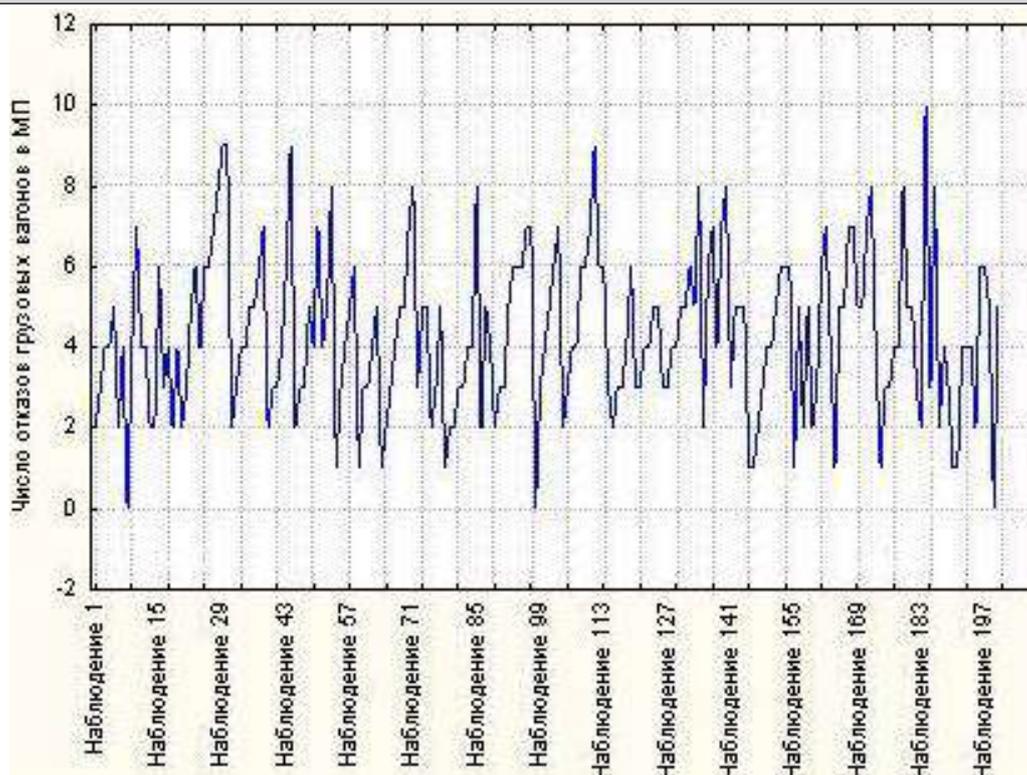


Рис. 1. Линейный график числа отказов выборочной совокупности грузовых вагонов  
 Fig. 1. Line graph of the number of failures of a freight wagons sample population

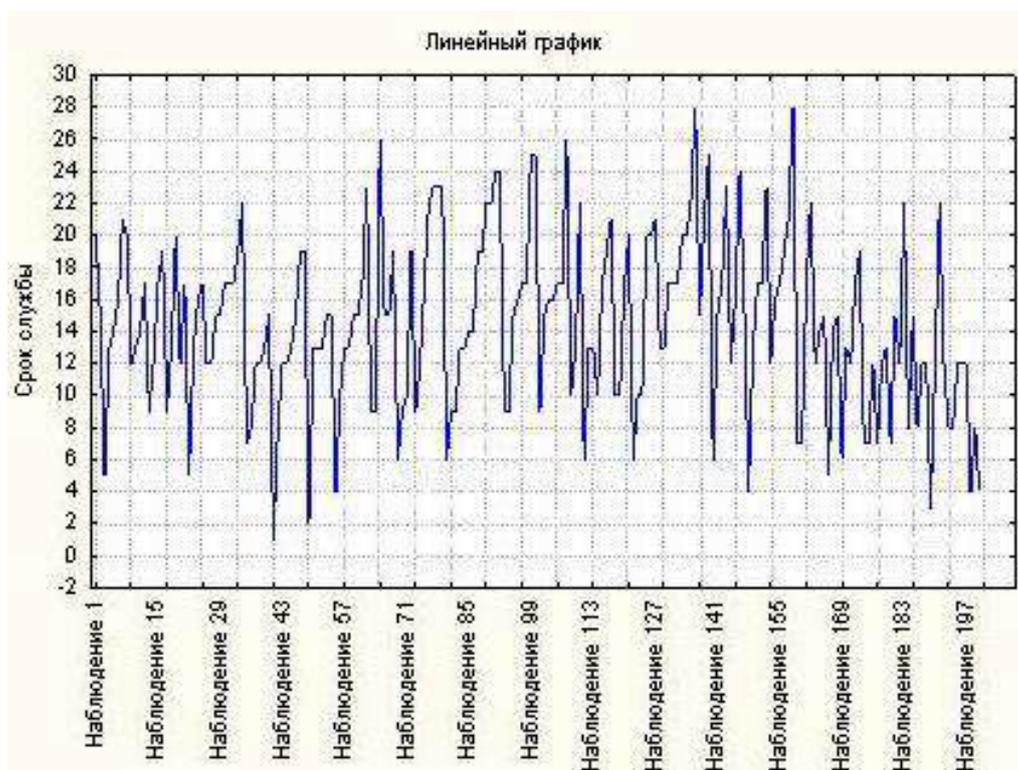


Рис. 2. Линейный график фактических сроков службы выборочной совокупности грузовых вагонов  
 Fig. 2. Linear graph of the actual service life of a freight wagons sample population

Выравнивание полученных эмпирических данных по закону редких событий Пуассона [18], в соответствии с которым вероятность события  $m_i$  раз при  $N$  опытах выполнено по формуле:

$$P(m_i) = \frac{\bar{m}^{m_i} e^{-\bar{m}}}{m_i!},$$

где  $m_i$  – число отказов грузовых вагонов;  $\bar{m}$  – число отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде.

Среднее значение параметра распределения для случайной величины – число отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде:

$$\bar{m} = \frac{\sum m_i n_i}{N} = \frac{862}{200} \approx 4,31.$$

Гистограмма распределения представлена на рис. 3. Для определения типа распределения необходимо выравнивание полученных статистических данных, как показано в табл. 3.

Таким образом, в результате статистического исследования установлено, что число от-

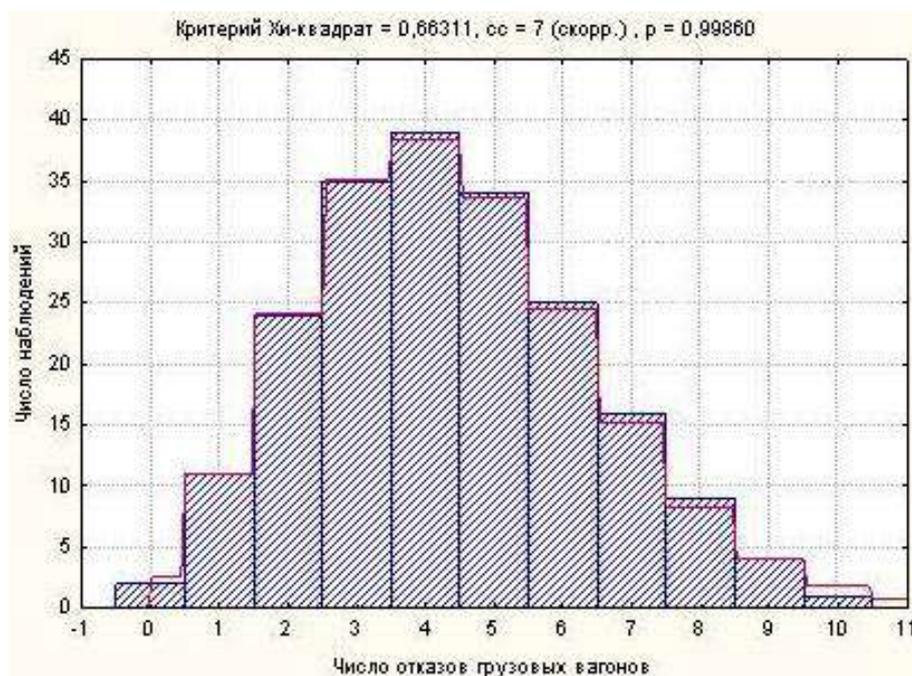


Рис. 3. Гистограмма числа отказов грузовых вагонов  
Fig. 3. Histogram of the number of freight wagons failures

Таблица 3. Выравнивание эмпирических данных по числу отказов грузовых вагонов  
Table 3. Alignment of empirical data on the number of freight wagons failures

Номер интервала Interval number	Число отказов $m_i$ Number of failures $m_i$	Частота $n_i$ Frequency $n_i$	$m_i n_i$	$P(m_i)$	$n'_i$
1	2	3	4	5	6
1	0	3	0	0,01357	2,714
2	1	11	11	0,05834	11,67
3	2	24	48	0,1254	25,08
4	3	35	105	0,1798	35,96
5	4	39	156	0,1933	38,66
6	5	35	175	0,1662	33,24
7	6	24	144	0,1191	23,82
8	7	15	105	0,0732	14,64
9	8	9	72	0,0393	7,86
10	9	4	36	0,0188	3,76
11	10	1	10	0,0081	1,62
	$\Sigma$	200	862		199,024

казов вагонов в межремонтном периоде подчиняется закону редких событий Пуассона, с функцией распределения равной

$$P(m_i) = \frac{\bar{m}^{m_i} e^{-\bar{m}}}{m_i!},$$

и наиболее вероятное число их появления между плановыми ремонтами равно четырем.

### Результаты исследований

После проведенного исследования закономерно возникает вопрос о выборе статистических данных для определения фактического срока службы выборочной совокупности грузовых вагонов на момент наблюдений.

Для аппроксимации полученных эмпирических данных по срокам службы грузовых вагонов, соответствующих закону распределения, весь числовой интервал выборочных данных, представленных в табл. 2, разбит на 14 интервалов с шагом  $h = 2$ . Сумма частот вариантов в каждом интервале и статистическое распределение выборки представлены в табл. 4.

Проведем выравнивание нижеприведенных частот по нормальному закону распределения. Введем обозначения:  $N$  – абсолютная частота появления значения случайной величины в заданном интервале;  $W$  – относительная частота появления значения случайной величины в заданном интервале;  $X$  – середина интервала;  $T$  – интервал выборочных данных. Для удобства расчетов проведем замену переменной  $X = 2T - 1$ .

Математическое ожидание случайной величины:

$$M(T) = \sum T_i \cdot W_i,$$

$$M(T) = 0,01 + 0,05 + 0,28 + 0,475 + \dots + 0,72 + 0,01 = 7,5.$$

$$M(T^2) = \sum T_i^2 W_i.$$

$$M(T^2) = 0,01 + 0,05 + 0,28 + 0,475 + \dots + 0,72 + 0,01 = 63,94.$$

$$M(X) = 2M(T) - 1 = 2 \cdot 7,5 - 1 = 14.$$

Дисперсия и среднее квадратичное отклонение случайной величины:

$$\sigma^2(X) = M(X^2) - [M(X)]^2;$$

$$\sigma^2(X) = 4 \cdot (63,94 - 56,25) = 30,76.$$

$$\sigma(X) = \sqrt{\sigma^2(X)} = \sqrt{30,76} \approx 5,55.$$

Следовательно, полагая, что распределение случайной величины подчиняется нормальному закону распределения, имеем следующее:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{5,55\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-14)^2}{61,52}}.$$

$$\text{Тогда } f(x) = \frac{1}{5,55\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} = 0,18z_u,$$

где

$$z_u = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}.$$

Полученные результаты могут быть сопоставлены с вероятностями попадания случайной величины на данный интервал:

$$P(a < X < b) = \left[ \Phi\left(\frac{b-m}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{a-m}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right],$$

где  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  – функция Лапласа.

Таблица 4. Статистическое распределение срока службы исследуемых грузовых вагонов

Table 4. Statistical distribution of service life of the studied freight wagons

Интервал	(0; 2)	(2; 4)	(4; 6)	(6; 8)	(8; 10)	(10; 12)	(12; 14)
$X$	1	3	5	7	9	11	13
$N$	2	5	9	14	19	24	27
$W$	0,01	0,025	0,045	0,07	0,095	0,12	0,135
$T$	1	2	3	4	5	6	7
$T^2$	1	4	9	16	25	36	49
$W$	0,01	0,025	0,045	0,07	0,095	0,12	0,135
Интервал	(14; 16)	(16; 18)	(18; 20)	(20; 22)	(22; 24)	(24; 26)	(26; 28)
$X$	15	17	19	21	23	25	27
$N$	27	24	19	14	5	3	1
$W$	0,135	0,12	0,095	0,07	0,045	0,025	0,01
$T$	8	9	10	11	12	13	14
$T^2$	64	81	100	121	144	169	196
$W$	0,135	0,12	0,095	0,07	0,045	0,025	0,01

Тогда

$$P(0 < X < 2) = 0,5[-\Phi(1,52) + \Phi(1,76)] =$$

$$= 0,5[-0,9661 + 0,9872] = 0,5 \cdot 0,0211 \approx 0,01,$$

$$P(2 < X < 4) = 0,5[-\Phi(1,28) + \Phi(1,52)] =$$

$$= 0,5[-0,9297 + 0,9661] = 0,5 \cdot 0,0364 \approx 0,02,$$

$$P(4 < X < 6) = 0,5[-\Phi(1,02) + \Phi(1,28)] =$$

$$= 0,5[-0,8508 + 0,9297] = 0,5 \cdot 0,0789 \approx 0,04,$$

$$P(6 < X < 8) = 0,5[-\Phi(0,76) + \Phi(1,02)] =$$

$$= 0,5[-0,7175 + 0,8505] = 0,5 \cdot 0,1333 \approx 0,07,$$

$$P(8 < X < 10) = 0,5[-\Phi(0,52) + \Phi(0,76)] =$$

$$= 0,5[-0,5379 + 0,7175] = 0,5 \cdot 0,1796 \approx 0,09,$$

$$P(10 < X < 12) = 0,5[-\Phi(0,26) + \Phi(0,52)] =$$

$$= 0,5[-0,2869 + 0,5379] = 0,5 \cdot 0,2510 \approx 0,13,$$

$$P(12 < X < 14) = 0,5[-\Phi(0) + \Phi(0,26)] =$$

$$= 0,5[0,0 + 0,2869] = 0,5 \cdot 0,2869 \approx 0,14,$$

Таблица 5. Вероятности попадания случайной величины на заданные интервалы

Table 5. Probabilities of a random variable falling within specified intervals

Интервал Interval	$t_1 = \frac{b-m}{\sigma\sqrt{2}}$	$t_2 = \frac{a-m}{\sigma\sqrt{2}}$	$\Phi(t_1)$	$\Phi(t_2)$	$\Phi(t_1) - \Phi(t_2)$	$P(a < X < b)$
(0; 2)	-1,52	-1,76	0,9661	0,9872	0,0211	0,01
(2; 4)	-1,28	-1,52	0,9297	0,9661	0,0364	0,02
(4; 6)	-1,02	-1,28	0,8508	0,9297	0,0789	0,04
(6; 8)	-0,76	-1,02	0,7175	0,8508	0,1333	0,07
(8; 10)	-0,52	-0,76	0,5379	0,7175	0,1796	0,09
(10; 12)	-0,26	-0,52	0,2869	0,5379	0,2510	0,13
(12; 14)	0	-0,26	0	0,2869	0,2869	0,14
(14; 16)	0,26	0	0,2869	0	0,2869	0,14
(16; 18)	0,52	0,26	0,5379	0,2869	0,2510	0,13
(18; 20)	0,76	0,52	0,7175	0,5379	0,1796	0,09
(20; 22)	1,02	0,76	0,8508	0,7175	0,1333	0,07
(22; 24)	1,28	1,02	0,9297	0,8508	0,0789	0,04
(24; 26)	1,52	1,28	0,9661	0,9297	0,0364	0,02
(26; 28)	1,78	1,52	0,9872	0,9661	0,0211	0,01

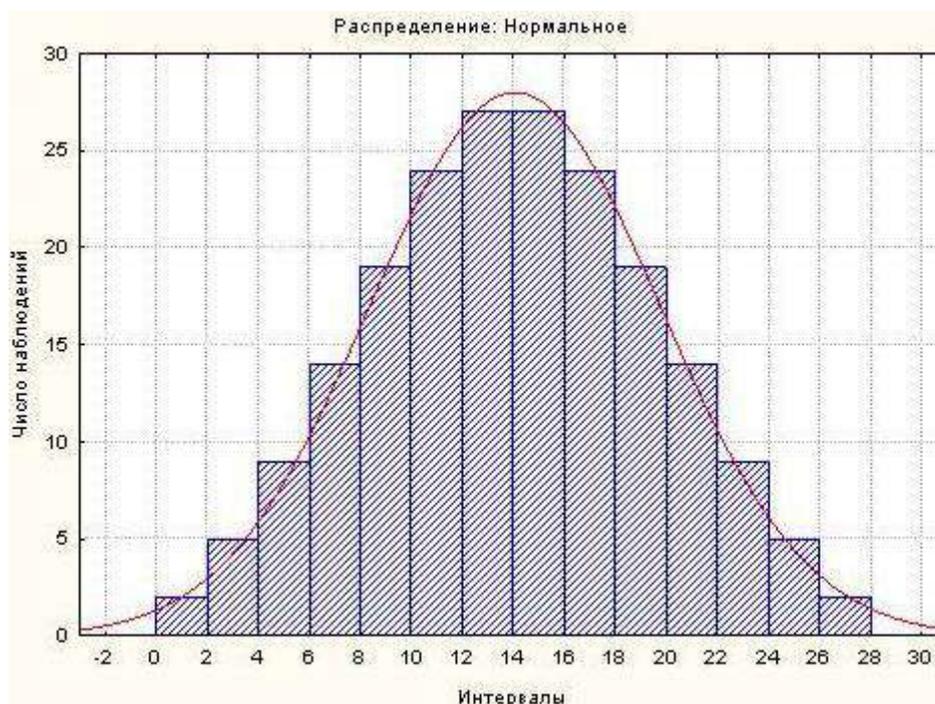


Рис. 4. Гистограмма распределения частот

Fig. 4. Frequency distribution histogram

$$\begin{aligned}
P(14 < X < 16) &= 0,5[\Phi(0,26) - \Phi(0)] = \\
&= 0,5[0,2869 - 0,0] = 0,5 \cdot 0,2869 \approx 0,14, \\
P(16 < X < 18) &= 0,5[\Phi(0,52) - \Phi(0,26)] = \\
&= 0,5[0,5379 - 0,2869] = 0,5 \cdot 0,2510 \approx 0,13, \\
P(18 < X < 20) &= 0,5[\Phi(0,76) - \Phi(0,52)] = \\
&= 0,5[0,7175 - 0,5379] = 0,5 \cdot 0,1796 \approx 0,09, \\
P(20 < X < 22) &= 0,5[\Phi(1,02) - \Phi(0,76)] = \\
&= 0,5[0,8505 - 0,7175] = 0,5 \cdot 0,1333 \approx 0,07, \\
P(22 < X < 24) &= 0,5[\Phi(1,28) - \Phi(1,02)] = \\
&= 0,5[0,9297 - 0,8505] = 0,5 \cdot 0,0789 \approx 0,04, \\
P(24 < X < 26) &= 0,5[\Phi(1,52) - \Phi(1,28)] = \\
&= 0,5[0,9661 - 0,9297] = 0,5 \cdot 0,0364 \approx 0,02, \\
P(26 < X < 28) &= 0,5[\Phi(1,78) - \Phi(1,52)] = \\
&= 0,5[0,9872 - 0,9661] = 0,5 \cdot 0,0211 \approx 0,01.
\end{aligned}$$

Полученные значения представлены в табл. 5, а гистограмма распределения – на рис. 4.

Сравнивая значения относительных частот и вероятностей ( $W$  и  $hf(x)$  или  $W$  и  $P(x)$ ), убеждаемся в том, что заданное статистическое распределение можно считать подчиненным нормальному закону.

Правдоподобность гипотезы о нормальном распределении случайной величины – фактический срок службы выборочной совокупности полувагонов – выполнена на основе критерия Пирсона.

Пирсоном предложен следующий критерий согласованности статистического и теоретического распределений:

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^l \frac{(w_i - p_i)^2}{p_i},$$

где  $w_i$  – относительные частоты;  $p_i$  – вероятности, полученные по некоторому теоретическому закону распределения.

Число степеней свободы:

$$r = l - t,$$

где  $l$  – число разрядов статистической таблицы;  $t$  – число условий, налагаемых на частоты.

Для нормального закона распределения  $t = 3$ , так как используются следующие условия:

$$\sum_{i=1}^l w_i = 1, \quad \sum_{i=1}^l w_i x_i = m_x, \quad \sum_{i=1}^l (x_i - m_x)^2 w_i = D_x,$$

где  $m_x$  и  $D_x$  – математическое ожидание и дисперсия случайной величины.

По значениям  $\chi^2$  и  $r$  определена величина  $\rho$ , характеризующая вероятность согласованно-

сти теоретического и статистического распределений. Если  $\rho < 0,1$ , то можно сделать вывод, что теория плохо воспроизводит эксперимент. Если же  $\rho \geq 0,1$ , то гипотеза о принятом теоретическом распределении не противоречит опытным данным.

Таким образом,

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^l \frac{(w_i - p_i)^2}{p_i} = 200 \cdot 0,00621 = 1,242.$$

Число разрядов статистической таблицы равно  $l = 14$ ; число условий, налагаемых на частоты, равно  $t = 3$ . Тогда число степеней свободы равно  $r = 14 - 3 = 11$ . Для  $r = 11$ : если  $\chi^2 = 1$ , то  $\rho = 0,9899$ ; если  $\chi^2 = 2$ , то  $\rho = 0,9985$ . Следовательно, при  $\chi^2 = 1,242$  получим промежуточное значение  $\rho$ . Это значение можно найти, применив способ интерполирования. При  $\chi^2 = 1$  и  $\chi^2 = 2$  значения  $\rho$  отличаются на величину

$$0,9985 - 0,9899 = 0,0086.$$

С увеличением  $\chi^2$  вероятность растет, поэтому  $\rho = 0,9899 + 0,0086 \cdot 0,242 = 0,9920$ .

Полученная вероятность больше, чем 0,1. Согласно критерию Пирсона, это дает основание считать, что нормальный закон достаточно удовлетворительно воспроизводит заданное статистическое распределение.

Интервальной оценкой (с надежностью  $\gamma$ ) математического ожидания нормально распределенного количественного признака  $X$  по выборочной средней и известном среднем квадратичном отклонении выборочной совокупности служит доверительный интервал

$$\bar{x}_B - t \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) < a < \bar{x}_B + t \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right), \quad (1)$$

где  $t \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) = \delta$  – точность оценки;  $n$  – объем выборки;  $t$  – значение аргумента функции Лапласа  $\Phi(t)$ , при котором  $\Phi(t) = \gamma/2$ ;  $\gamma = 0,95$  – надежность.

Подставляя значения в (1), найдем интервальные оценки для случайной величины – фактический срок службы исследуемых грузовых вагонов:

$$14 - 1,96 \left( \frac{5,55}{\sqrt{200}} \right) < a < 14 + 1,96 \left( \frac{5,55}{\sqrt{200}} \right),$$

$$14 - 0,8 < a < 14 + 0,8 \text{ или } 13,2 < a < 14,8.$$

Таблица 5. Согласованность нормального распределения по критерию Пирсона

Table 5. Consistency of normal distribution by Pearson test

Интервал Interval	$W$	$P$	$W - P$	$(W - P)^2$	$(W - P)^2 / P$
(0; 2)	0,01	0,01	0	0	0
(2; 4)	0,025	0,02	0,005	0,000025	0,00125
(4; 6)	0,045	0,04	0,005	0,000025	0,000625
(6; 8)	0,07	0,07	0	0	0
(8; 10)	0,095	0,09	0,005	0,000025	0,00028
(10; 12)	0,12	0,13	-0,01	0,0001	0,00077
(12; 14)	0,135	0,14	-0,005	0,000025	0,00018
(14; 16)	0,135	0,14	-0,005	0,000025	0,00018
(16; 18)	0,12	0,13	-0,01	0,0001	0,00077
(18; 20)	0,095	0,09	0,005	0,000025	0,00028
(20; 22)	0,07	0,07	0	0	0
(22; 24)	0,045	0,04	0,005	0,000025	0,000625
(24; 26)	0,025	0,02	0,005	0,000025	0,00125
(26; 28)	0,01	0,01	0	0	0
$\Sigma$					0,00621

### Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что число отказов грузовых вагонов в межремонтном периоде представляет собой пуассоновский поток событий, функция распределения которого равна  $P(m_i) = \frac{\bar{m}^{m_i} e^{-\bar{m}}}{m_i!}$ . Наиболее

вероятное число отказов полувагонов в процессе эксплуатации равно четырем. При этом фактический срок службы выборочной совокупно-

сти полувагонов подчиняется нормальному закону распределения с плотностью вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \text{ и с надежностью 95 \%}$$

находится в интервале от 13,2 до 14,8 лет. Результаты данных исследований необходимы для планирования технических, эксплуатационных, финансовых и стратегических ресурсов вагонного хозяйства и отрасли в целом [19, 20].

### Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 № 3363-р // Правительство Рос. Федерации : сайт. URL : <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (Дата обращения 30.08.2023).
2. Лapidус Б.М. Задачи опережающего развития российских железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2023. № 2. С. 4–14.
3. Задачи и перспективы развития научных исследований в рамках сотрудничества между ОАО «РЖД» и Российской академией наук / Н.А. Махутов, Б.М. Лapidус, М.М. Гаденин и др. // Железнодорожный транспорт. 2023. № 7. С. 6–11.
4. Кабанов А.Б., Осминин А.Т. Научный подход к планированию железнодорожных грузовых перевозок // Железнодорожный транспорт. 2022. № 8. С. 12–16.
5. Москвичев О.В., Москвичева Е.Е., Мищенко Е.А. На основе сквозного контроля сроков доставки грузов и порожних вагонов // Железнодорожный транспорт. 2022. № 9. С. 12–16.
6. Шаньгин Р.В. Надежность рельсов в различных условиях эксплуатации // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 2. С. 2–3.
7. Певзнер В.О., Гринь Е.Н. Совершенствование системы управления техническим обслуживанием пути // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 54–59.
8. Голубев О.В. Повышение эффективности мониторинга рельсовой колеи // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 10. С. 24–28.
9. Маловецкая Е.В., Мозалевская А.К. Возможности применения моделей ARIMA при построении прогнозных значений вагонопотоков // Т-Сопп: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 1. С. 33–41.
10. Конон А.А. Определение собственных частот колебаний элементов железнодорожного пути под поездной нагрузкой и выбор упругих амортизаторов // Бюл. результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 57–64.
11. Ермоленко И.Ю., Рогозинская А.Л. Определение динамической нагрузки от колеса на рельс при извилистом движении // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 4(53). С. 40–44.
12. Свидетельство № 2022661676. Программа для определения технико-эксплуатационных показателей работы стыковой железнодорожной станции на основе использования статистических данных и вариантных прогнозных сценариев

колебаний поступающих вагонопотоков / Е.В. Маловецкая, А.В. Супруновский, А.К. Мозалевская : № 2022660561 ; завл. 07.06.2022 ; зарегистр. 24.06.2022.

13. Иванов А.А., Плотников И.В., Устич П.А. Экономический расчет периодичности плановых ремонтов грузовых вагонов. М. : МИИТ. 2006. 44 с.

14. Иванова Т.В., Налабордин Д.Г., Ларченко Е.А. Оптимизация назначенного срока службы полувагона по критерию безубыточности эксплуатации // Экономика железных дорог. 2015. № 11. С. 60–68.

15. Налабордин Д.Г., Иванова Т.В. Статистическая оценка безотказной работы грузовых вагонов в межремонтном периоде на основе анализа выживаемости объектов // Науч. проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 2. С. 125–129.

16. Иванова Т.В., Налабордин Д.Г., Ларченко Е.А. Оценка стоимости жизненного цикла полувагона по коэффициенту эксплуатационных затрат // Экономика железных дорог. 2015. № 4. С. 38–45.

17. О методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта : распоряжение ОАО «РЖД» от 27.12.2007 № 2459р. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.

18. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высш. шк., 2003. 478 с.

19. Болотин М.М., Воротников В.Г. Отказы и срок службы грузового вагона // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 2. С. 152–161.

20. Петровых В.А., Иванова Т.В., Налабордин Д.Г. Оптимизация назначенного срока службы полувагона по критерию безубыточности эксплуатации // Вагоны и вагонное хозяйство. 2014. № 2. С. 40–42.

### References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 №3363-r «Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Order of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (Accessed August 30, 2023).

2. Lapidus B.M. Zadachi operezhayushchego razvitiya rossiiskikh zheleznykh dorog [Tasks of advanced development of Russian railways]. *Zhelezнодорожный транспорт* [Railway transport], 2023, no. 2, pp. 4–14.

3. Makhutov N.A., Lapidus B.M., Gadenin M.M., Titov E.Yu. Zadachi i perspektivy razvitiya nauchnykh issledovaniy v ramkakh sotrudnichestva mezhdru ОАО «RZhD» i Rossiiskoi akademiei nauk [Tasks and prospects for the development of scientific research within the framework of cooperation between JSC «Russian Railways» and the Russian Academy of Sciences]. *Zhelezнодорожный транспорт* [Railway transport], 2023, no. 7, pp. 6–11.

4. Kabanov A.B., Os'minin A.T. Nauchnyi podkhod k planirovaniyu zhelezнодорожных грузовых перевозок [Scientific approach to the planning of rail freight transportation]. *Zhelezнодорожный транспорт* [Railway transport], 2022, no. 8, pp. 12–16.

5. Moskvichev O.V., Moskvicheva E.E., Mishchenko E.A. Na osnove skvoznoy kontrolya srokov dostavki грузов i porozhnykh vagonov [Based on end-to-end control of the delivery time of goods and empty wagons]. *Zhelezнодорожный транспорт* [Railway transport], 2022, no. 9, pp. 12–16.

6. Shan'gin R.V. Nadezhnost' rel'sov v razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii [Reliability of rails in various operating conditions]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2022, no. 2, pp. 2–3.

7. Pevzner V.O., Grin' E.N. Sovershenstvovanie sistemy upravleniya tekhnicheskim obsluzhivaniem puti [Improvement of the track maintenance management system]. *Zhelezнодорожный транспорт* [Railway transport], 2021, no. 2, pp. 54–59.

8. Golubev O.V. Povyshenie effektivnosti monitoringa rel'sovoi kolei [Improving the efficiency of monitoring the rail gauge]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2023, no. 10, pp. 24–28.

9. Malovetskaya E.V., Mozalevskaya A.K. Vozmozhnosti primeneniya modelei ARIMA pri postroenii prognoznykh znachenii vagonopotokov [The possibilities of using ARIMA models in constructing forecast values of wagon traffic]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and Transport], 2023, vol. 17, no. 1, pp. 33–41.

10. Konon A.A. Opredelenie sobstvennykh chastot kolebaniy elementov zhelezнодорожного пути pod poezdnoi nagruzkoi i vybor uprugikh amortizatorov [Determination of natural oscillation frequencies of railway track elements under train load and selection of elastic shock absorbers]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2021, no. 4, pp. 57–64.

11. Ermolenko I.Yu., Rogozinskaya A.L. Opredelenie dinamicheskoi nagruzki ot koleasa na rel's pri izvilistom dvizhenii [Determination of the dynamic load from the wheel on the rail during tortuous movement]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University], 2020, no. 4(53), pp. 40–44.

12. Malovetskaya E.V., Suprunovskii A.V., Mozalevskaya A.K. Certificate of registration of a computer program 2022661676, 24.06.2022.

13. Ivanov A.A., Plotnikov I.V., Ustich P.A. Ekonomicheskii raschet periodichnosti planovykh remontov грузовых вагонов [Economic calculation of the frequency of scheduled repairs of freight wagons]. Moscow: MIIT Publ., 2006. 44 p.

14. Ivanova T.V., Nalaborin D.G., Larchenko E.A. Optimizatsiya naznachennogo sroka sluzhby poluvagona po kriteriyu bezubytchnosti ekspluatatsii [Optimization of the assigned service life of a gondola wagon according to the criterion of break-even operation]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of Railways], 2015, no. 11, pp. 60–68.

15. Nalaborin D.G., Ivanova T.V. Statisticheskaya otsenka bezotkaznoi raboty грузовых вагонов v mezhremontnom periode na osnove analiza vyzhivaemosti ob'ektov [Statistical evaluation of the trouble-free operation of freight wagons in the inter-repair period based on the analysis of the survival rate of objects]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East], 2010, no. 2, pp. 125–129.

16. Ivanova T.V., Nalabordin D.G., Larchenko E.A. Otsenka stoimosti zhiznennogo tsikla poluvagona po koeffitsientu ekspluatatsionnykh zatrat [Estimation of the life cycle cost of a gondola wagon by the coefficient of operating costs]. *Ekonomika zheleznikh dorog* [Economics of Railways], 2015, no. 4, pp. 38–45.

17. Rasporuyazhenie OAO «RZhD» ot 27.12.2007 № 2459r «O metodike opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla i limitnoi tseny podvizhnogo sostava i slozhnykh tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 27, 2007 No 2459r «On the methodology for determining the life cycle cost and the limit price of rolling stock and complex technical systems of long-distance transport»].

18. Gmurman V.E. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003. 478 p.

19. Bolotin M.M., Vorotnikov V.G. Otkazy i srok sluzhby gruzovogo vagona [Failures and service life of a freight wagon]. *Mir transporta* [World of Transport], 2012, no. 2, pp. 152–161.

20. Petrovykh V.A., Ivanova T.V., Nalabordin D.G. Optimizatsiya naznachennogo sroka sluzhby poluvagona po kriteriyu bezubytchnosti ekspluatatsii [Optimization of the assigned service life of a gondola wagon according to the criterion of break-even operation]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2014, no. 2, pp. 40–42.

### Информация об авторах

**Иванова Татьяна Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: ivanova@zab.megalink.ru.

**Рудаков Владимир Александрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: rudakov@zab.megalink.ru.

**Ковригина Инна Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; innabella84@mail.ru.

### Information about the authors

**Tat'yana V. Ivanova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of Department of Railway Rolling Stock, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: ivanova@zab.megalink.ru.

**Vladimir A. Rudakov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: rudakov@zab.megalink.ru.

**Inna V. Kovrigina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: innabella84@mail.ru.

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА  
ИНФОРМАЦИИ**

**COMPUTER SCIENCE, INFORMATION MANAGEMENT  
AND PROCESSING**

## Моделирование процесса кумуляции для определения толщины и прогиба сегментной облицовки заряда перфоратора, обеспечивающего максимальную глубину пробития

А.Р. Мухутдинов<sup>1</sup>, З.Р. Вахидова<sup>2</sup>, М.Г. Ефимов<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Российская Федерация

<sup>2</sup>Университет управления «ТИСБИ», г. Казань, Российская Федерация

✉jero07@bk.ru

### Резюме

На нефтяных скважинах широко применяется энергия взрыва в виде кумулятивной струи, которая пробивает канал. При прострелочно-взрывных работах на нефтяных скважинах находят применение перфораторы на основе кумулятивных зарядов с сегментной облицовкой. Однако проведение прострелочно-взрывных работ – процесс дорогостоящий и опасный. Поэтому перспективным является его компьютерное моделирование, более дешевое и безопасное по сравнению с натурным экспериментом. Так, для моделирования процесса, характеризуемого малым временем протекания, большими деформациями и перемещениями, частичным или полным разрушением материала, перспективно использовать прикладное программное обеспечение ANSYS AUTODYN. В данной статье описывается разработанная и отработанная методика создания компьютерной модели для точного определения пробивного действия кумулятивного заряда перфоратора из смесового энергонасыщенного материала повышенной мощности с сегментной облицовкой по глубине канала в стальной плите. Проведен виртуальный эксперимент с моделью кумулятивного заряда перфоратора для изучения направленного действия взрыва. Представлено сравнительное изучение результатов компьютерного моделирования и натурального эксперимента пробивной способности кумулятивных зарядов. С помощью вычислительных экспериментов установлено влияние прогиба и толщины облицовки на глубину пробития. В ходе вычислительного эксперимента для заряда перфоратора найдены эффективные значения толщины и прогиба сегментной облицовки кумулятивного заряда перфоратора.

### Ключевые слова

компьютерное моделирование, кумулятивный заряд с сегментной облицовкой, глубина пробития, толщина медной облицовки

### Для цитирования

Мухутдинов А.Р. Моделирование процесса кумуляции для определения толщины и прогиба сегментной облицовки заряда перфоратора, обеспечивающего максимальную глубину пробития / А.Р. Мухутдинов, З.Р. Вахидова, М.Г. Ефимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 172–180. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).172-180.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 07.02.2023 г.; поступила после рецензирования: 11.09.2023 г.; принята к публикации: 12.09.2023 г.

## Simulation of the cumulation process to determine the thickness and deflection of the segmental cladding of the perforator charge, providing maximum penetration depth

A.R. Mukhutdinov<sup>1</sup>, Z.R. Vakhidova<sup>2</sup>, M.G. Efimov<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, the Russian Federation

<sup>2</sup>University of Management «TISBI», Kazan, the Russian Federation

✉jero07@bk.ru

### Abstract

In oil wells, explosive energy is widely used in the form of a cumulative jet that breaks through a channel. For perforation and blasting operations in oil wells, perforators based on shaped charges with segmental cladding are used. However, carrying out perforation and blasting operations is expensive and dangerous. Therefore, it is promising to carry out computer modeling of the cumulation process, which is cheaper and safer as compared to a full-scale experiment. Thus, to simulate a process characterized by short flow times, large deformations and displacements, partial or complete destruction of the material, it is promising to use the ANSYS AUTODYN applied software. This article, using modern information technologies (in ANSYS AUTODYN applied software), presents a developed and tested methodology for creating a computer model for accurate determining of breakdown effect of the cumulative charge of a perforator made of a mixed energy-saturated material of high power with segmental cladding along the depth of the channel in steel plate. A virtual experiment was carried out with a model of a shaped charge of a perforator to study the directional

effect of an explosion. A comparative study of the results of computer modeling and a full-scale experiment on the penetration ability of shaped charges is presented. Using computational experiments, the influence of deflection and lining thickness on the penetration depth was established. During a computational experiment for a perforator charge, the effective values of the thickness and deflection of the segmental cladding of the perforator shaped charge were found.

### Keywords

computer simulation, shaped charge with segmental lining, penetration depth, copper lining thickness

### For citation

Mukhutdinov A.R., Vakhidova Z.R., Efimov M.G. Modelirovanie protsessa kumulyatsii dlya opredeleniya tolshchiny i progiba segmentnoi oblitsovki zaryada perforatora, obespechivayushchego maksimal'nyu glubinu probitiya [Simulation of the cumulation process to determine the thickness and deflection of the segmental cladding of the perforator charge, providing maximum penetration depth]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 172–180. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).172-180.

### Article Info

Received: February 7, 2023; Revised: September 11, 2023; Accepted: September 12, 2023.

### Введение

На нефтяных промыслах широко применяется энергия взрыва в виде кумулятивной струи, которая пробивает канал. При прострелочно-взрывных работах на нефтяных скважинах находят применение перфораторы на основе кумулятивных зарядов (КЗ) с сегментной облицовкой [1–3]. Проблемой компьютерного моделирования процесса кумуляции занимаются многие исследователи [1–18], однако мало изучено моделирование процесса кумуляции зарядов с сегментной облицовкой. Следует отметить, что преимущество использования компьютерного моделирования процесса кумуляции заключается в его наглядности, дешевизне и безопасности. Поэтому изучение возможности применения компьютерных технологий для точного моделирования процесса кумуляции зарядов с сегментной облицовкой является актуальной задачей, имеющей научный и практический интерес. Научные исследования проводятся с применением информационных технологий [10–18] на образцах при ограниченном размере и весе. Их эффективность оценивается величиной пробивного действия. Развитие прикладных программных средств для моделирования быстропротекающих процессов способствует применению вычислительного эксперимента для определения максимального пробивного действия КЗ. Так, для моделирования процесса, характеризуемого малым временем протекания, большими деформациями и перемещениями, частичным или полным разрушением материала, перспективно использовать прикладное программное обеспечение (ППО) ANSYS AUTODYN [6–9].

Задачей данной работы является изучение моделирования в ППО ANSYS AUTODYN влияния на глубину пробития КЗ толщины медной сегментной облицовки. Оценка влияния на глубину пробития КЗ толщины медной сегментной облицовки проводилась в ходе работы на компьютерных моделях процесса кумуляции зарядов перфораторов.

### Методика и объект исследования

Целью данной работы является моделирование процесса кумуляции КЗ перфоратора из смесового энергонасыщенного материала повышенной мощности типа А1 (СЭМППМтА1) с сегментной облицовкой (КЗПсСО) для определения влияния толщины медной сегментной облицовки на глубину пробития.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать современное состояние применения компьютерного моделирования КЗ перфораторов в научной литературе.
2. Разработать компьютерную модель КЗ перфоратора с сегментной облицовкой.
3. Провести виртуальный эксперимент с моделью КЗ перфоратора для изучения направленного действия взрыва.
4. Провести сравнительное изучение результатов компьютерного моделирования и натурального эксперимента по определению пробивной способности КЗ.

Объектом исследования является процесс кумуляции КЗПсСО из СЭМППМтА1 [19] в перфораторах. Предлагаемая методика включает следующие этапы:

1. Запуск ППО ANSYS AUTODYN.
2. Создание компьютерной модели.

3. Выбор материалов, которые будут использоваться в построении модели.

4. Определение значения плотности СЭМПМтА1. Изменение модели эрозии материалов.

5. Создание начальных граничных условий для воздуха.

6. Создание конечных граничных условий.

7. Создание Лагранжевой части для стальной плиты.

8. Создание Эйлеровой части для воздуха, взрывчатого вещества и облицовки.

9. Создание геометрической модели КЗ.

10. Создание Эйлеровой части для взрыва.

11. Определение условий оттока Эйлеровой части для взрыва за границы модели.

12. Установление Лагранж-Лагранж взаимодействия.

13. Установление Эйлер-Лагранж-взаимодействия.

14. Установление точки детонации.

15. Определение контроля решений (для всех моделей количество циклов – 10 000).

16. Определение выходных параметров.

17. Настройка отображений модели.

18. Проведение расчета пробивного действия КЗ. Оценка полученного значения.

19. Создание GIF-анимации решенной задачи (Graphics Interchange Format – формат для обмена изображениями).

Построение модели осуществлялось в двумерной постановке, симметрия – осевая. Численное интегрирование уравнений совместно с определяющими соотношениями для материалов при соответствующих начальных и граничных условиях выполнялось на эйлеровой сетке – для воздуха и СЭМПМтА1, а на лагранжевой сетке – для стальной плиты. Пространственное разрешение составляло три ячейки на 1 мм для эйлеровых частей модели, а для лагранжевой части – одна ячейка к 1 мм. СЭМПМтА1 и материал для облицовки и плиты выбирались из стандартной библиотеки программы.

При создании компьютерной модели кумулятивного действия взрыва использовались уравнения:

1. Для СЭМПМтА1 (обозначение в программе А1) – уравнение Джонса – Уилкинса – Ли (JWL), которое описывает состояние и поведение продуктов детонации.

2. Для воздуха (в программе AIR) – урав-

нение идеального газа (Ideal Gas), описывающее зависимость между давлением, объемом и абсолютной температурой газа. Внутренняя энергия начального условия для воздуха задавалась  $2,068 \cdot 10^5$  Дж/кг, чтобы инициализировать его с давлением в одну атмосферу. Следует отметить, что для СЭМПМтА1 и воздуха нет моделей прочности.

3. Для меди (в программе Copper) – уравнение полиномиальное (Polynomial), которое описывает его состояние и поведение.

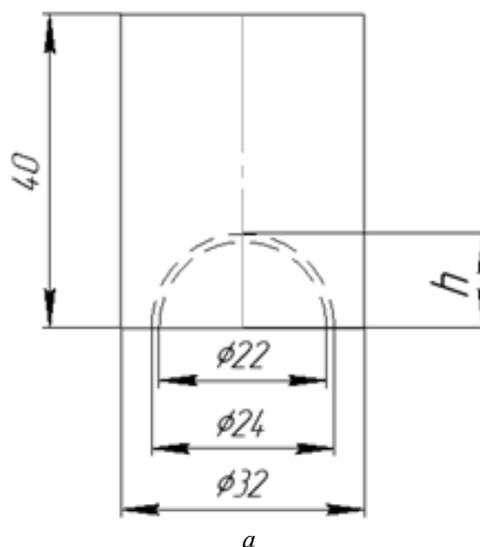
4. Для стали (в программе STEEL 1006) – уравнение ударной адиабаты (Shock), которое описывает процесс взаимодействия.

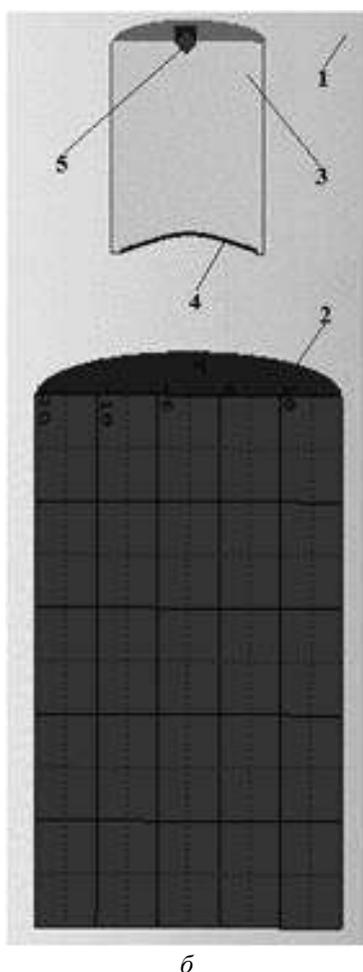
При учете прочности при взаимодействии сред использовались следующие модели: Джонсона – Кука для стали (STEEL 1006) и Джонсона – Холмквиста для меди (Copper).

На левой, правой и верхней границах модели устанавливались граничные условия Flow Out (в программе Euler), определяющие возможность свободного течения веществ изнутри за пределы расчетного поля без каких-либо отражений от границ.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

В работе рассматривается цилиндрический кумулятивный заряд с сегментной медной облицовкой, изготовленный методом глухого прессования из вещества типа А1. Диаметр заряда – 32 мм, высота – 40 мм, плотность –  $1,60$  г/см<sup>3</sup>. Исследуемая толщина облицовки 0,3–1,1 мм, диаметр основания облицовки – 24 мм, прогиб облицовки  $h$  – 0,41–0,45 (рис. 1).





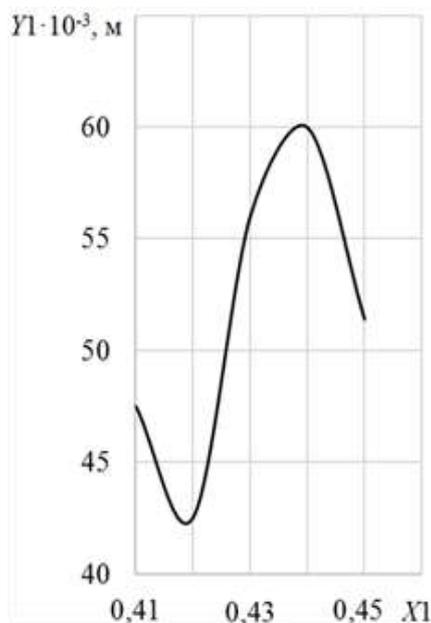
**Рис. 1.** Чертеж кумулятивного заряда с сегментной облицовкой (а) и схема виртуальных испытаний (б): 1 – воздух; 2 – стальная пластина; 3 – кумулятивный заряд перфоратора; 4 – сегментная медная облицовка; 5 – точка иницирования заряда

**Fig. 1.** Drawing of a shaped charge with segmental cladding (a) and the scheme of virtual tests (b): 1 – air; 2 – steel plate; 3 – cumulative charge of the perforator; 4 – segmented copper cladding; 5 – charge initiation point

Пробивную способность заряда определяют, оценивая глубину и диаметр входного отверстия в преграде. В качестве материала для преграды использовались металлические пластины марки Сталь 3 (Ст3). Эта марка относится к стали конструкционной углеродистой обыкновенного качества. Химический состав стали Ст3 по ГОСТ 380-2005 [20].

Изучение величины прогиба проводили в несколько этапов: грубое определение экстремумов выходных параметров, сужение диапа-

зона поиска и определение его эффективного значения. На первом этапе провели определение экстремумов выходных параметров, т.е. зависимости глубины пробития ( $Y1$ ) от прогиба медной облицовки толщиной 1 мм. Результаты представлены на рис. 2.

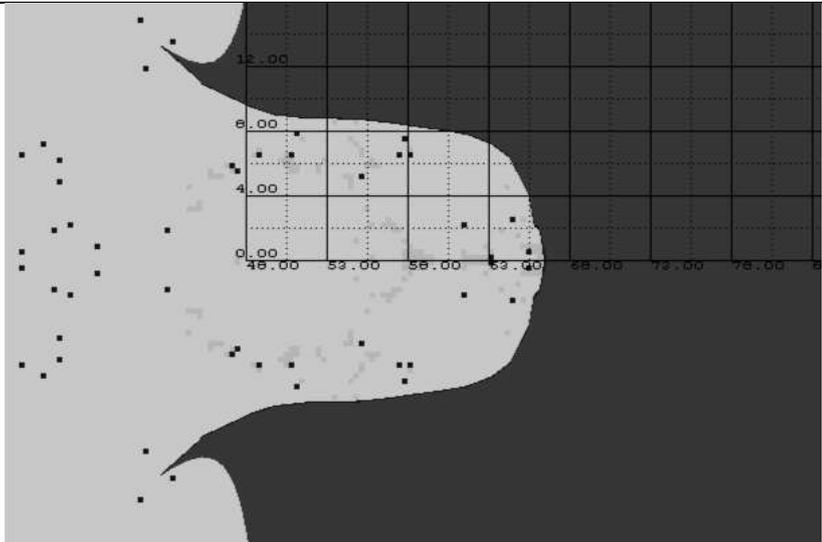
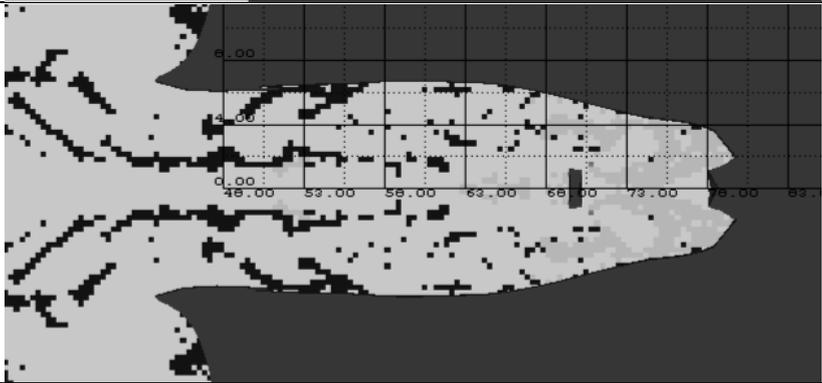
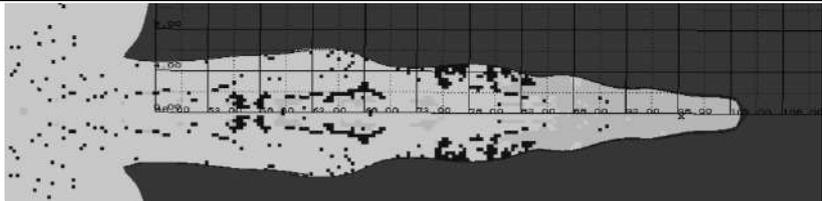
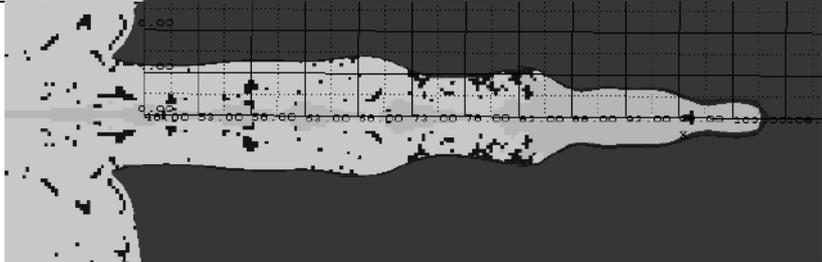


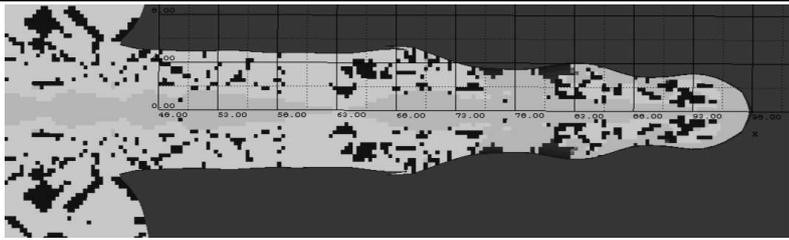
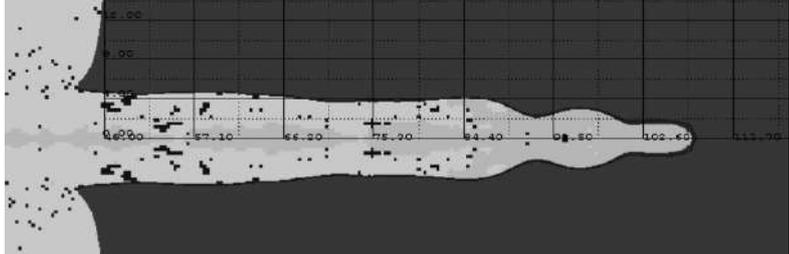
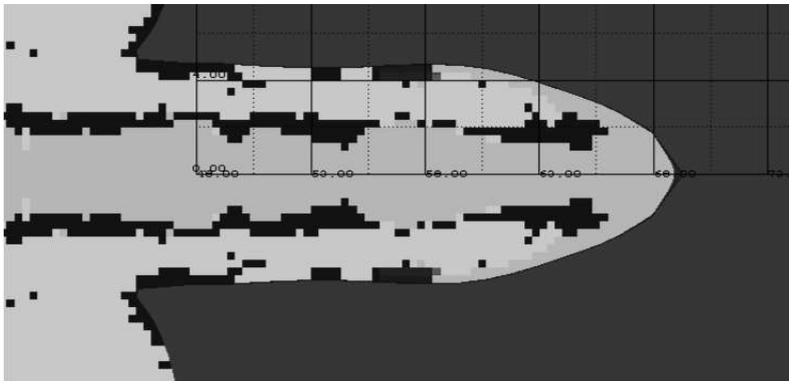
**Рис. 2.** График зависимости глубины пробития ( $Y1$ ) от прогиба ( $X1$ ) медной облицовки толщиной 1 мм  
**Fig. 2.** Graph of penetration depth ( $Y1$ ) versus deflection ( $X1$ ) of 1 mm thick copper cladding

На графике видно, что при прочих равных параметрах зарядов с увеличением прогиба сегментной облицовки в диапазоне от 0,41 до 0,45 максимальная глубина пробития достигается при прогибе 0,44. При дальнейшем увеличении прогиба глубина пробития резко уменьшается. Проанализировав полученные результаты, определяем предпочтительную величину прогиба сегментной медной облицовки – 0,44.

На втором этапе проводим определение предпочтительного значения толщины медной облицовки с прогибом 0,44. Данные, полученные путем компьютерного моделирования процесса кумуляции, представлены в табл. 1. По ним построен график зависимости глубины пробития ( $Y1$ ) и диаметра входного отверстия ( $Y2$ ) от толщины медной облицовки ( $X2$ ) с изгибом 0,44 (рис. 3).

**Таблица 1.** Результаты моделирования пробития преграды зарядами с медной сегментной облицовкой различной толщины и прогибом 0,44  
**Table 1.** The results of modeling the penetration of an obstacle by charges with a copper segmental cladding of various thicknesses and a deflection of 0,44

Толщина, м	Форма пробития	Глубина пробития, м	Диаметр входного отверстия, м
$\times 10^{-3}$		$\gamma 1 \cdot 10^{-3}$	$\gamma 2 \cdot 10^{-3}$
0,3		18,75	25
0,5		31,25	14
0,7		56,25	13
0,8		58,75	12

0,9		50,0	12
1		60,0	12
1,1		22	12

Из графика делаем следующие выводы:

1. Глубина пробития стальной преграды зарядом, имеющим сегментную облицовку изгибом 0,44, зависит от толщины этой облицовки.

2. При изменении толщины облицовки 0,3–0,8 мм наблюдается увеличение глубины пробития до 58,75 мм.

3. При толщине облицовки 0,9 мм глубина пробития уменьшается до 50,0 мм. При тол-

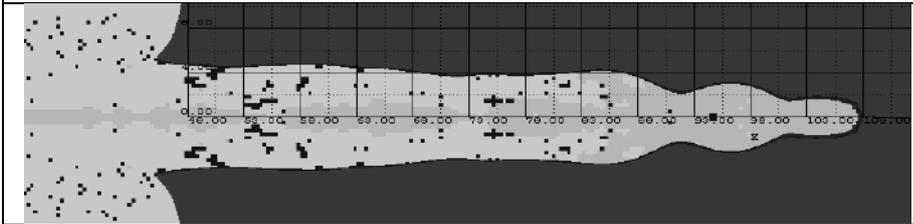
щине 1 мм значение глубины пробития максимально и равно 60,0 мм.

4. Далее увеличение толщины медной облицовки ведет к резкому уменьшению пробивной способности заряда.

Проверим достоверность полученного результата ППО ANSYS AUTODYN на трех параллельных испытаниях. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты моделирования пробития преграды зарядами с медной сегментной облицовкой толщиной 1 мм и изгибом 0,44

**Table 2.** The results of modeling the penetration of an obstacle by charges with a copper segmental cladding 1 mm thick and a bend of 0,44

Форма пробития	Глубина пробития, м	Диаметр входного отверстия, м
	$Y1 \cdot 10^{-3}$	$Y2 \cdot 10^{-3}$
	60,0	12
	60,0	12
	60,0	12

Результаты трехкратного проведения компьютерного расчета показали, что полученный результат не является случайным.

Таким образом, в ходе вычислительного эксперимента для заряда перфоратора (диаметр  $d_3$  – 32 мм, высота – 40 мм, плотность вещества типа А1 – 1,60 г/см<sup>3</sup>, диаметр основания облицовки – 24 мм, фокусное расстояние –  $1,5 \cdot d_3$ ) найдены предпочтительные эксплуатационные параметры сегментной облицовки: толщина 1 мм при изгибе 0,44.

### Заключение

1. Использование компьютерного моделирования на основе современных информационных технологий для изучения процесса кумуляции при прострелочно-взрывных работах в нефтяных скважинах является актуальным.

2. Отработана методика создания компьютерной модели для точного определения про-

бивного действия КЗ перфоратора из смесового энергонасыщенного материала повышенной мощности типа А1 с сегментной облицовкой по глубине канала в стальной плите.

3. Отработана методика создания компьютерной модели КЗ перфоратора с сегментной облицовкой. Проведен виртуальный эксперимент с моделью КЗ перфоратора для изучения направленного действия взрыва. Представлено сравнительное изучение результатов компьютерного моделирования и натурального эксперимента пробивной способности КЗ.

4. С помощью вычислительных экспериментов установлено влияние прогиба и толщины облицовки на глубину пробития. Определены предпочтительные значения прогиба и толщины сегментной облицовки кумулятивного заряда перфоратора.

### Список литературы

1. Попов В.В. Прострелочно-взрывные работы в скважинах. Новочеркасск : ЮРГТУ, 2007. 213 с.
2. Кумуляция и ее использование во взрывной технике / В.Г. Хотин, И.И. Томашевич, М.Т. Нгунен и др. М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007. 87 с.
3. Федоров С.В., Ладов С.В., Никольская Я.М. Сравнительный анализ формирования кумулятивных струй из конических и полусферических облицовок // Инженерный журнал: наука и инновации : электрон. науч.-техн. изд. 2018. № 1. URL : <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1720.html> (Дата обращения: 01.02.2023).
4. Физика взрыва (в 2 т). Т. 2. / Л.П. Орленко, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др. М. : Физматлит, 2004. 656 с.
5. Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств // Наука и образование : электрон. науч. изд. 2012. № 2. URL : <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (Дата обращения: 01.02.2023).
6. Компьютерное моделирование процесса вскрытия пласта с использованием кумулятивных зарядов / Б.П. Рыбакин, Н.Н. Смирнов, В.Д. Горячев и др. // Вестник кибернетики. 2018. № 3 (31). С. 9–18.
7. Воеводка А., Витковский Т. Моделирование формирования струи в линейных кумулятивных зарядах // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 3. С. 130–136.
8. Моделирование образования кумулятивной струи модельного заряда // Моделирование и цифровые двойники : сайт. URL : <https://www.cadferm-cis.ru/list/webinars/modelirovanie-obrazovaniya-kumuljativnoj-strui-modelnogo-zarjada/?ysclid=lmzadvsl0z163580729> (Дата обращения: 31.01.2023).
9. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г. Основы применения ANSYS AUTODYN для решения задач моделирования быстропотекающих процессов. Казань : КГТУ, 2016. 280 с.
10. Гапоненко Ю.А. Численное моделирование газовой кумуляции продуктов взрыва при детонации плоских параллельных зарядов // Вычислительные технологии. 2000. Т. 5. № 4. С. 31–39.
11. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г., Вахидова З.Р. Численное моделирование процесса кумуляции зарядов с сегментными облицовками с применением пакета ANSYS AUTODYN // Нелинейный мир. 2020. Т. 18. № 4. С. 34–40.
12. Митков В.Е., Белин В.А., Шишков П.К. Разработка малочувствительного энергетического взрывчатого материала и создание из него режущих кумулятивных зарядов // Горн. информ.-аналит. бюл. 2022. № 5. С. 108–120.
13. Шилин П.Д. Моделирование кумулятивного эффекта в среде Ansys // Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам XIII междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2018. № 3 (13). С. 5–10.
14. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г., Вахидова З.Р. Моделирование процесса кумуляции зарядов перфораторов при прострелочно-взрывных работах в скважинах // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2022. № 4 (585). С. 20–24.
15. Исследования и математическое моделирование явлений, связанных с развитием и воздействием взрывов / В.А. Андрущенко, Е.Л. Ступицкий, Д.С. Моисеева и др. М. : РАН, 2020. 192 с.
16. Балаганский И.А., Мерзиевский Л.А. Взрывные системы с инертными высокомодульными элементами. Новосибирск : НГТУ, 2016. 170 с.
17. Тарасов В.И., Янилкин Ю.В., Ведерников Ю.А. Трехмерное численное моделирование кумулятивных зарядов со звездчатой формой облицовки // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 6. С. 180–185.
18. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г., Вахидова З.Р. Определение прогиба сегментной облицовки заряда перфоратора при прострелочно-взрывных работах в нефтяных скважинах для обеспечения максимальной глубины пробития моделированием процесса кумуляции // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2023. № 4 (597). С. 27–33.

19. ГОСТ 32162-2013. Вещества взрывчатые промышленные. Классификация. Введ. 2014–01–01. М. : Стандартинформ, 2014. 7 с.
20. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. Введ. 2008–07–01. М. : Стандартинформ, 2009. 11 с.

### References

1. Popov V.V. Prostrelochno-vzryvnye raboty v skvazhinakh [Drilling and blasting in wells]. Novocheboksaysk : YuRGU Publ., 2007. 213 p.
2. Khotin V.G., Tomashevich I.I., Ngunen M.T., Ustimenko V.A. Kumulyatsiya i ee ispol'zovanie vo vzryvnoi tekhnike [Cumulation and its use in explosive technology]. Moscow: RKhTU im. D. I. Mendeleeva Publ., 2007. 87 p.
3. Fedorov S.V., Ladov S.V., Nikol'skaya Ya.M. Sravnitel'nyi analiz formirovaniya kumulyativnykh strui iz konicheskikh i polusfericheskikh oblitsoвок [Comparative analysis of the formation of cumulative jets from conical and semi-spherical facings]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2018, no. 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1720.html> (Accessed February 1, 2023).
4. Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Odintsov V.A., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Selivanov V.V., Solov'ev V.S., Stanyukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. Fizika vzryva (v 2 t). T. 2 [Physics of explosion (in 2 vol.). Vol. 2]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2004. 656 p.
5. Kolpakov V.I. Matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya vzryvnykh ustroystv [Mathematical modeling of the functioning of explosive devices]. *Nauka i obrazovanie* [Science and education], 2012, no. 2. Available at : <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (Accessed February 1, 2023).
6. Rybakov B.P., Smirnov N.N., Goryachev V.D., Kravchenko M.N., Stomov L.I. Komp'yuternoe modelirovanie protsessov vskrytiya plasta s ispol'zovaniem kumulyativnykh zaryadov [Computer simulation of the formation opening process using shaped charges]. *Vestnik kibernetiki* [Bulletin of Cybernetics], 2018, no. 3 (31), pp. 9–18.
7. Voevodka A., Vitkovski T. Modelirovanie formirovaniya strui v lineinykh kumulyativnykh zaryadakh [Modeling of jet formation in linear shaped charges]. *Fizika goreniya i vzryva* [Physics of burning and explosion], 2014, vol. 50, no. 3, pp. 130–136.
8. Modelirovanie obrazovaniya kumulyativnoi strui model'nogo zaryada (Elektronnyi resurs) [Simulation of the formation of a cumulative jet of a model charge]. Available at: <https://www.cadfm-cis.ru/list/webinars/modelirovanie-obrazovaniya-kumulyativnoy-strui-modelnogo-zaryada/?ysclid=lmzadvsloz163580729> (Accessed January 31, 2023).
9. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G. Osnovy primeneniya ANSYS AUTODYN dlya resheniya zadach modelirovaniya bystroprotekayushchikh protsessov [Fundamentals of using ANSYS AUTODYN to solve problems of modeling fast-flowing processes]. Kazan': KGTU Publ., 2016. 280 p.
10. Gaponenko Yu.A. Chislennoe modelirovanie gazovoi kumulyatsii produktov vzryva pri detonatsii ploskikh paralel'nykh zaryadov [Numerical simulation of gas accumulation of explosion products during detonation of plane parallel charges]. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies], 2000, vol. 5, no. 4, pp. 31–39.
11. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Vakhidova Z.R. Chislennoe modelirovanie protsessov kumulyatsii zaryadov s segmentnymi oblitsovkami s primeneniem paketa ANSYS AUTODYN [Numerical simulation of the charge accumulation process with segment facings using the ANSYS AUTODYN package]. *Nelineinyy mir* [Nonlinear World], 2020, vol. 18, no. 4, pp. 34–40.
12. Mitkov V.E., Belin V.A., Shishkov P.K. Razrabotka malochuvstvitel'nogo energeticheskogo vzryvchatogo materiala i sozdanie iz nego rezhushchikh kumulyativnykh zaryadov [Development of low-sensitivity energy explosive material and creation of cutting shaped charges from it]. *Gornyye informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2022, no. 5, pp. 108–120.
13. Shilin P.D. Modelirovanie kumulyativnogo effekta v srede Ansys [Modeling of the cumulative effect in the Ansys environment]. *Sbornik statei po materialam XIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnyi forum: tekhnicheskoe i fizikomatematicheskie nauki»* [Proceedings based on the materials of the XIII International Scientific and Practical Conference «Scientific forum: technical and physics and mathematical sciences»]. Moscow, 2018, no. 3 (13), pp. 5–10.
14. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Vakhidova Z.R. Modelirovanie protsessov kumulyatsii zaryadov perforatorov pri prostrelochno-vzryvnykh rabotakh v skvazhinakh [Modeling of the process of accumulating charges of perforators during drilling and blasting operations in wells]. *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK* [Automation and informatization of the fuel and energy complex], 2022, no. 4 (585), pp. 20–24.
15. Andrushchenko V.A., Stupitskii E.L., Moiseeva D.S., Motorin A.A., Murashkin I.V. Issledovaniya i matematicheskoe modelirovanie yavlenii, svyazannykh s razvitiem i vozdeystviem vzryvov [Research and mathematical modeling of phenomena related to the development and impact of explosions]. Moscow: RAN Publ., 2020. 192 p.
16. Balaganskii I.A., Merzhievskii L.A. Vzryvnye sistemy s inertnymi vysokomodul'nymi elementami [Explosive systems with inert high-modulus elements]. Novosibirsk: NGTU Publ., 2016. 170 p.
17. Tarasov V.I., Yanilkin Yu.V., Vedernikov Yu.A. Trekhmernoe chislennoe modelirovanie kumulyativnykh zaryadov so zvezdoobraznoi formoi oblitsovki [Three-dimensional numerical simulation of shaped charges with a star-shaped lining]. *Fizika goreniya i vzryva* [Physics of burning and explosion], 2000, vol. 36, no. 6, pp. 180–185.
18. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Vakhidova Z.R. Opredelenie progiba segmentnoi oblitsovki zaryada perforatora pri prostrelochno-vzryvnykh rabotakh v neftyanykh skvazhinakh dlya obespecheniya maksimal'noi glubiny probitiya modelirovaniem protsessov kumulyatsii [Determination of the deflection of the segmental lining of the perforator charge during drilling and blasting operations in oil wells to ensure the maximum penetration depth by modeling the cumulating process]. *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK* [Automation and informatization of the Fuel and energy Complex], 2023, no. 4 (597), pp. 27–33.

19. GOST 32162-2013. Veshchestva vzryvchatye promyshlennye. Klassifikatsiya [State Standard 32162-2013. Commercial explosives. Classification]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 7 p.

20. GOST 380-2005. Stal' uglerodistaya obyknovennogo kachestva. Marki [State Standard 380-2005. Common quality carbon steel. Grades]. Moscow: Standartinform Publ., 2009. 11 p.

### Информация об авторах

**Мухутдинов Аглям Рашидович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; e-mail: muhutdi-nov@rambler.ru.

**Вахидова Зульфия Рашидовна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики, Университет управления «ТИСБИ», г. Казань; e-mail: MRZulphiya@rambler.ru.

**Ефимов Максим Геннадьевич**, ассистент кафедры технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; e-mail: jero07@bk.ru.

### Information about the authors

**Aglyam R. Mukhutdinov**, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Solid Chemicals, Kazan National Research Technological University, Kazan'; e-mail: muhutdinov@rambler.ru.

**Zul'phiya R. Vakhidova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, University of Management «TISBI», Kazan'; e-mail: MRZulphiya@rambler.ru.

**Maksim G. Efimov**, Assistant of the Department of Technology of Solid Chemicals, Kazan National Research Technological University, Kazan'; e-mail: jero07@bk.ru.

## Определение гидравлических характеристик трубопроводной арматуры при использовании конечно-элементного анализа

А.В. Буданов, Н.В. Петров, Ш.С. Нозирзода✉, Е.Д. Петрова

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, Российская Федерация  
✉shoni\_@mail.ru

### Резюме

В работе рассмотрены способы определения гидравлических характеристик трубопроводной арматуры. Вычислена пропускная характеристика клеточного регулирующего клапана, а также проведено сравнение результатов стендовых испытаний и конечно-элементного анализа пропускной способности клапана в зависимости от степени открытия регулирующего органа «золотника». В исследовании использованы методы конечно-элементного моделирования и статистической обработки данных. Разработана 3D-модель арматуры, которая установлена на участке трубопровода. На первом этапе расчета проверена сходимость сетки, определен размер ее ячеек и влияние размера ячейки на результаты расчета. В соответствии с требованиями ГОСТ 34437-2018 предусмотрены участки трубопровода до и после арматуры. Построены графики пропускной характеристики клапана, полученной по итогам конечно-элементного моделирования, экспериментальной пропускной характеристики клапана, корреляция результатов конечно-элементного анализа и экспериментальных данных. Также построен график отклонения полученных значений. Можно сделать вывод, что конечно-элементный анализ необходим при проектировании клапанов на различных стадиях производства для снижения общих издержек. Предложения по практическому применению данных научного исследования заключаются в их использовании в проектировании объектов атомной и нефтегазовой промышленности. В научной работе указаны полученные расчетные и экспериментальные значения пропускной способности, а также дана оценка возможности применения конечно-элементного анализа при выполнении проектирования клапанов.

### Ключевые слова

моделирование, гидравлические характеристики, трубопроводная арматура, регулирующий клапан

### Для цитирования

Определение гидравлических характеристик трубопроводной арматуры при использовании конечно-элементного анализа / А.В. Буданов, Н.В. Петров, Ш.С. Нозирзода, Е.Д. Петрова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 181–189. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).181-189.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 10.08.2023 г.; поступила после рецензирования: 15.09.2023 г.; принята к публикации: 18.09.2023 г.

## Determination of hydraulic characteristics of pipeline fittings using finite element analysis

A.V. Budanov, N.V. Petrov, Sh.S. Nozirzoda✉, E.D. Petrova

Yaroslav the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod, the Russian Federation  
✉shoni\_@mail.ru

### Abstract

In this paper, methods for determining the hydraulic characteristics of pipeline fittings are considered. The starting characteristic of the cellular control valve was determined, and the results of bench tests and the results of finite element analysis of the valve capacity were compared depending on opening degree of the regulating organ of the «spool». The method of finite element modeling and the method of statistical data processing are used. A 3D model of the fitting installed on the pipeline section has been developed. At the first stage of the calculation, the convergence of the grid was checked, the size of the grid cells and the effect of the cell size on the calculation results were determined. In accordance with the requirements of State Standard 34437-2018, sections of the pipeline before and after the fittings are provided. Graphs of the flow characteristics of the valve obtained from the results of the finite element simulation, the experimental flow characteristics of the valve, the correlation of the results of the finite element analysis and experimental data are constructed. A graph of the deviation of the obtained values was also plotted. It can be concluded that finite element analysis is necessary in the design of valves at various stages of production to reduce overall costs. Proposals for the practical application of the scientific research data are to use them in the design of nuclear and oil and gas industry facilities. The scientific work indicates the obtained calculated and experimental values of throughput, as well as assesses the possibility of using finite element analysis when designing valves.

**Keywords**

modeling, hydraulic characteristics, pipeline fittings, control valve

**For citation**

Budanov A.V., Petrov N.V., Nozirezoda Sh.S., Petrova E.D. Opredelenie gidravlicheskih kharakteristik truboprovodnoi armatury pri ispol'zovanii konechno-elementnogo analiza [Determination of hydraulic characteristics of pipeline fittings using finite element analysis]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 181–189. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).181-189.

**Article info**

Received: August 10, 2023; Revised: September 15, 2023; Accepted: September 18, 2023.

**Введение**

Применение технологий компьютерного моделирования, а именно конечно-элементного (КЭ) анализа, при проектировании тепломеханического оборудования является наиболее выгодным вариантом в текущих условиях рыночной экономики, так как позволяет сокращать экономические издержки, связанные с необходимостью проведения испытаний оборудования с целью подтверждения заданных технических характеристик. Одной из наиболее востребованных отраслей в рамках проведения КЭ анализа является атомная промышленность, так как стоимость изделий, обеспечивающих транспорт определенной среды для данной отрасли, значительно выше, чем для изделий общепромышленного типа. Высокая стоимость оборудования обусловлена значительным объемом контроля, проверок и испытаний, проводимых с целью подтверждения его качества, а также заявленных технических характеристик.

На этапе конструирования распространено проведение конечно-элементного моделирования с целью определения прочностных характеристик как деталей, так и сборочных элементов трубопроводов [1], а также гидравлические расчеты участков трубопровода [2–5].

Целью данного исследования является изучение пропускной характеристики клеткового регулирующего клапана, а также сравнение результатов натуральных испытаний и математического моделирования пропускной спо-

собности в зависимости от степени открытия регулирующего органа «золотника». Аналогичные расчеты и сравнения с экспериментом проводились в исследовании [2] на примере шарового клапана.

**Методика исследования**

Основные использованные методы:

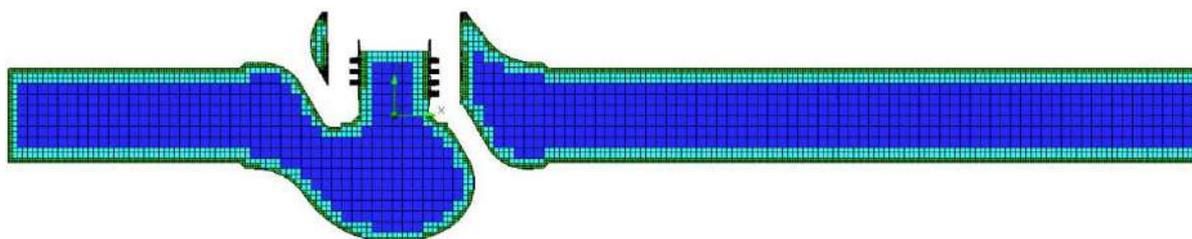
- метод КЭ моделирования [6–11];
- метод статистической обработки данных [12].

В рамках первого метода была разработана 3D-модель арматуры, устанавливаемая на участке трубопровода, которая соответствует геометрическим и физико-механическим параметрам реального образца, так как разработана в соответствии с реальной конструкторской документацией и техническими условиями.

Для проведения КЭ анализа необходимо подготовить 3D-модель клапана с целью исключения ошибок в решении, а именно устранить зазоры, а затем корректно построить расчетную сетку и задать исходные условия задачи.

**Результаты исследования**

На первом этапе расчета проверяется сходимость сетки (рис. 1). Здесь определяется размер ячеек сетки и его влияние на результаты расчета. Применение крупной сетки не позволит получить корректные параметры ввиду невозможности решения задачи в местах сужения потока, например, в отверстиях клетки. С другой



**Рис. 1.** Результат наложения сетки на элементы трубопровода  
**Fig. 1.** The result of the mesh overlay on the pipeline elements

стороны, слишком разреженная сетка потребует значительного машинного времени и ресурсов, что не всегда целесообразно.

Для данного моделирования применялась сетка с количеством элементов сетки 1 104 371.

Значения исходных данных:

- диаметр условный – 150 мм;
- скорость среды на входе – 0,5 м/с, рассчитана исходя из условия развитого турбулентного потока по аналогии с [13] и в соответствии с требованиями ГОСТ 34437–2018;
- модель турбулентности –  $k-\epsilon$ ;
- давление на выходе – 101 355 Па.

Применяемый тип конечного элемента –

гексаэдр, так как, согласно исследованиям [14, 15], применение данного типа конечного элемента повышает точность проводимого исследования. На рис. 2 приведены результаты наложения сетки в приближении.

В местах сужения, переходов, скруглений, а также определения пристеночного слоя выполнена локальная адаптация сетки, т.е. уменьшение размера ячейки с целью максимально точного повторения проточной части клапана (рис. 3).

Также в соответствии с требованиями ГОСТ 34437–2018 необходимо предусмотреть участки трубопровода до и после арматуры 2Dn

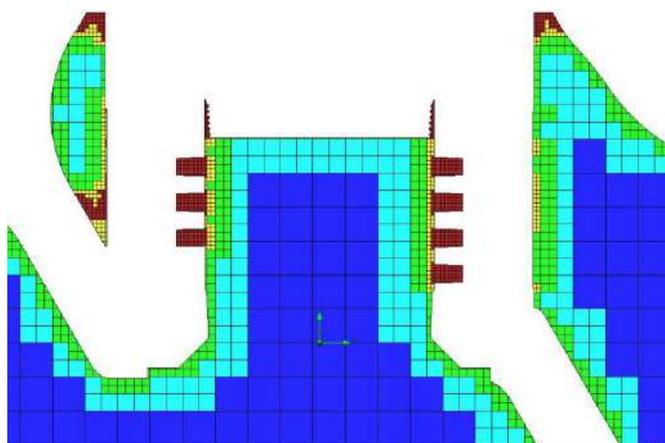


Рис. 2. Результат наложения сетки в приближении

Fig. 2. The result of the mesh overlay in the approximation

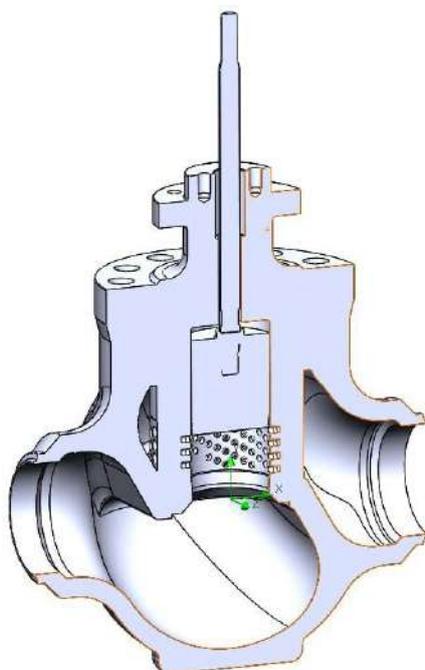


Рис. 3. 3D-модель арматуры в разрезе

Fig. 3. 3D-model of the fitting in the section

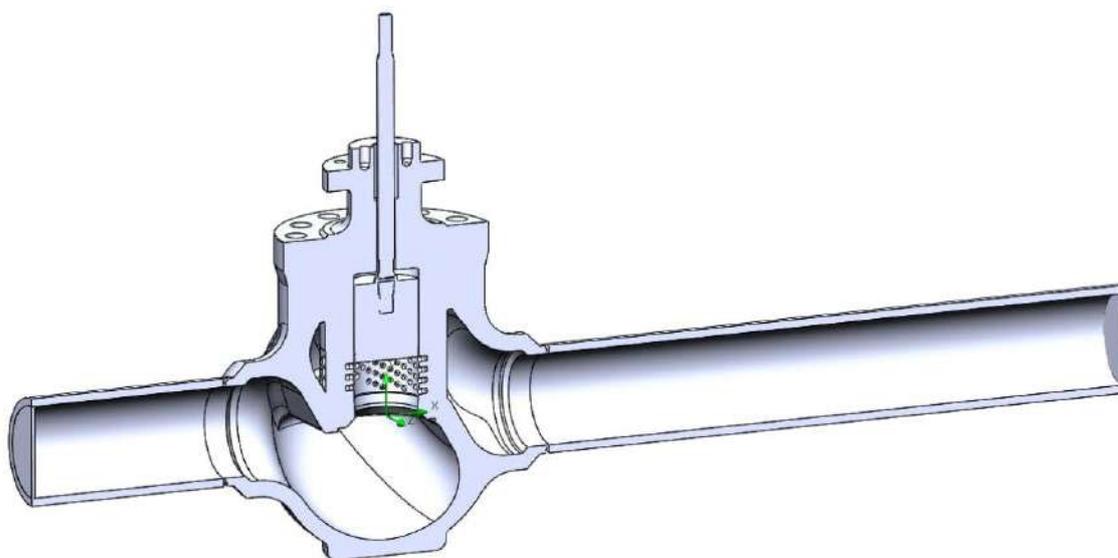


Рис. 4. 3D-модель арматуры с участками трубопровода  
Fig. 4. 3D-model of fittings with pipeline sections

и 6Dn соответственно. В данных точках производится замер параметров скорости и давления (рис. 4). Стабилизирующие участки 10Dn и 20Dn до и после арматуры не учитывались при моделировании ввиду того, что на входе задавалось граничное условие потока с развитым профилем скорости. Кроме того, при моделировании отсутствует источник возмущения потока перед клапаном, каким является вентилятор при натуральных испытаниях, а также элементы противодействия за клапаном.

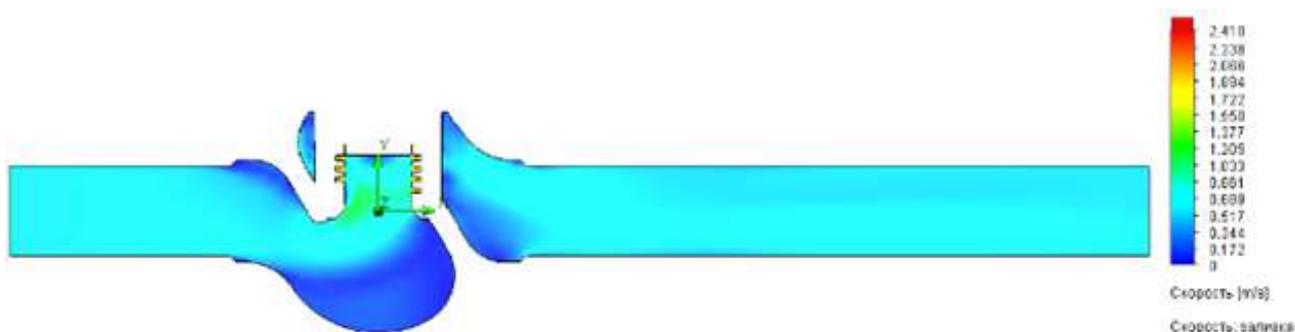
В соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 34437–2018 «Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик», определялись параметры расхода,

давления и перепада давления с последующим расчетом пропускной способности и предварительным расчетом числа Рейнольдса:

$$K_v = \frac{3,57 \cdot 10^4 \cdot Q}{B} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\Delta P}},$$

где  $K_v$  – пропускная способность арматуры, м<sup>3</sup>/ч;  $Q$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_1$  – плотность газа при параметрах до арматуры, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta P$  – перепад (потери) давления на арматуре, Па [16–18].

Далее приведены результаты моделирования течения среды через клапан при степени открытия клапана 100 % (рис. 5). Значение пропускной способности при 100 % открытии регулирующего органа клапана составляет 164,5 м<sup>3</sup>/ч.



а

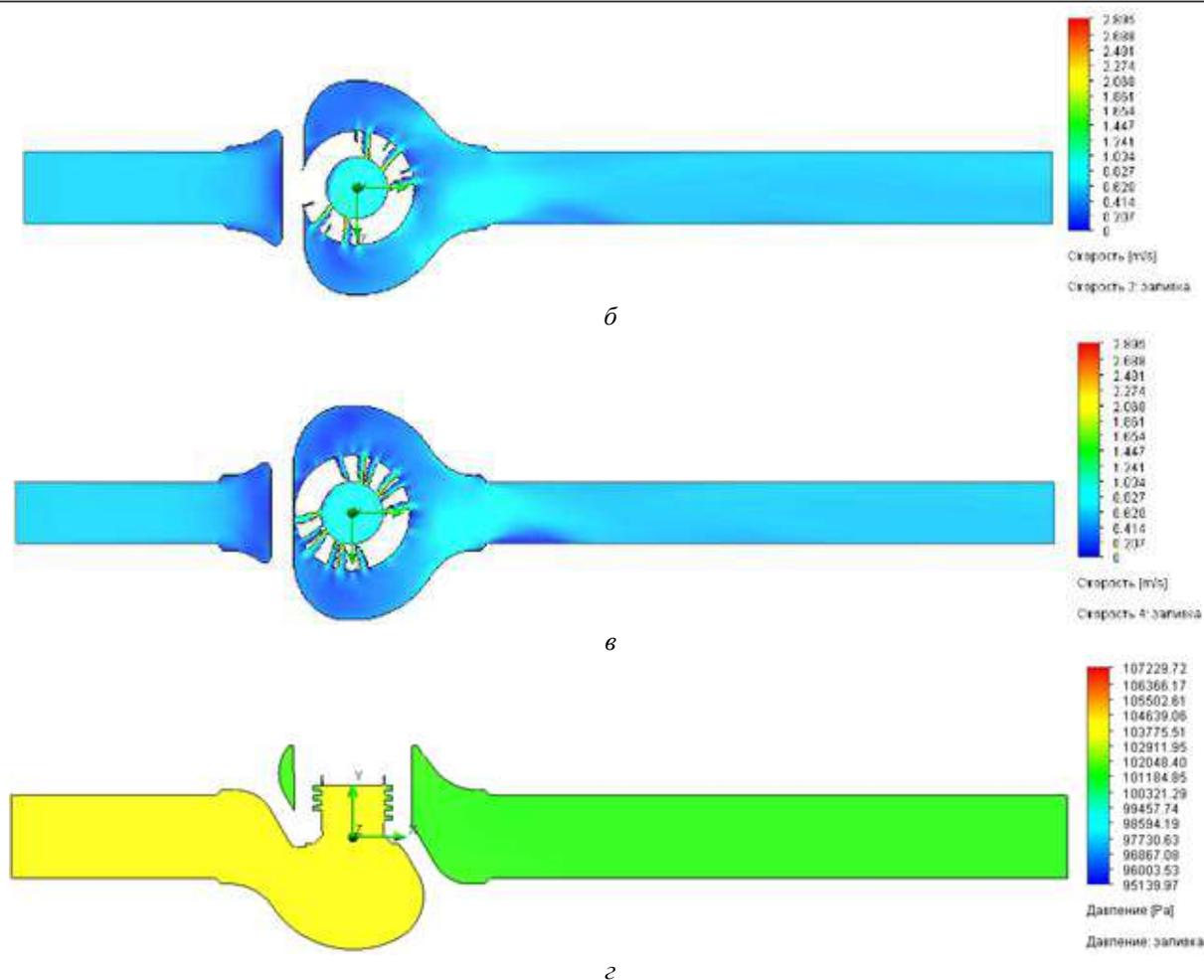


Рис. 5. Поле скорости:

*a* – в основном сечении; *б* – в сечении клетки 1; *в* – в сечении клетки 2; *г* – поле давления в основном сечении

Fig. 5. Velocity field:

*a* – in the main section; *b* – in the cell section 1; *c* – in the cell section 2; *d* – pressure field in the main section

### Обсуждение результатов

Рассмотрим значения пропускной способности клапана ( $K_V$ ) при других степенях открытия клапана, а также график пропускной характеристики (рис. 6).

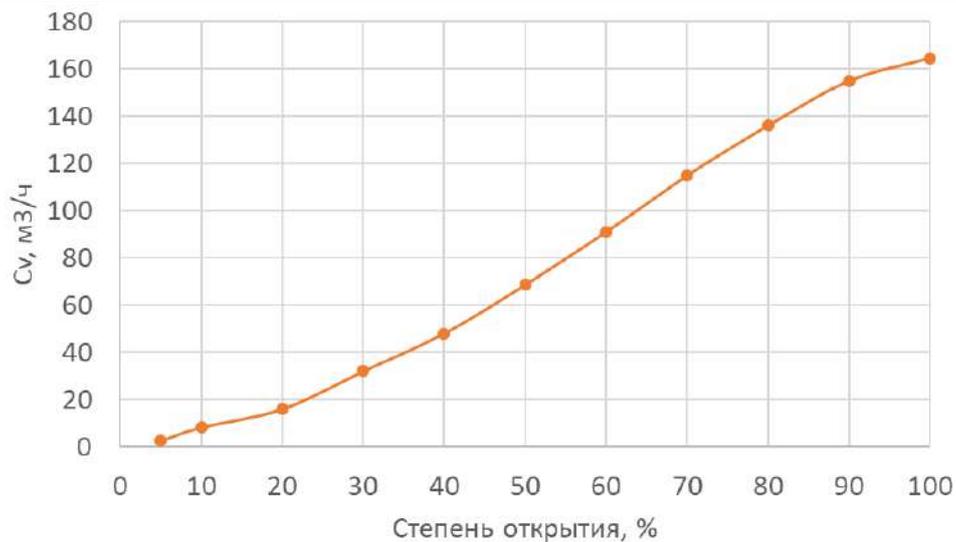
График (см. рис. 6) показывает значения пропускной способности ( $K_V$ ) для клапана при различных степенях его открытия в процентах. Если клапан открыт на 40 %, то его пропускная способность ( $K_V$ ) составляет 48 м<sup>3</sup>/ч. Если клапан полностью открыт, то его пропускная способность ( $K_V$ ) составляет 164,5 м<sup>3</sup>/ч.

Испытания проводились на стенде (рис. 7). Схема стенда включает следующие компоненты: 1, 2 – лабораторные вентиляторы; 3 – расходомерное устройство; 4 – испытуемый клапан.

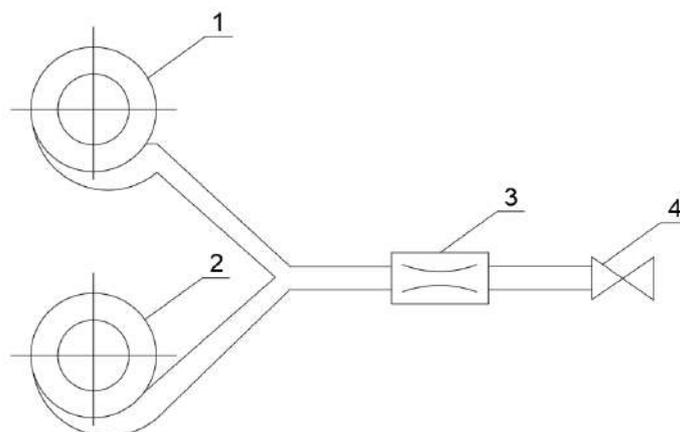
Далее приведены значения  $K_V$  (рис. 8), полученные в результате пролива клапана, регулируемого на испытательном стенде. Данное испытание проводится с целью обеспечения заданной долговечности трубопроводной арматуры при воздействии внутренних и внешних сил и показывает долговечность трубопроводной арматуры.

Для подтверждения полученных результатов в ходе теоретического моделирования конечно-элементным методом рассмотрена корреляция значений эксперимента. На рис. 9 приведен график сравнения теоретического анализа и проведенного эксперимента.

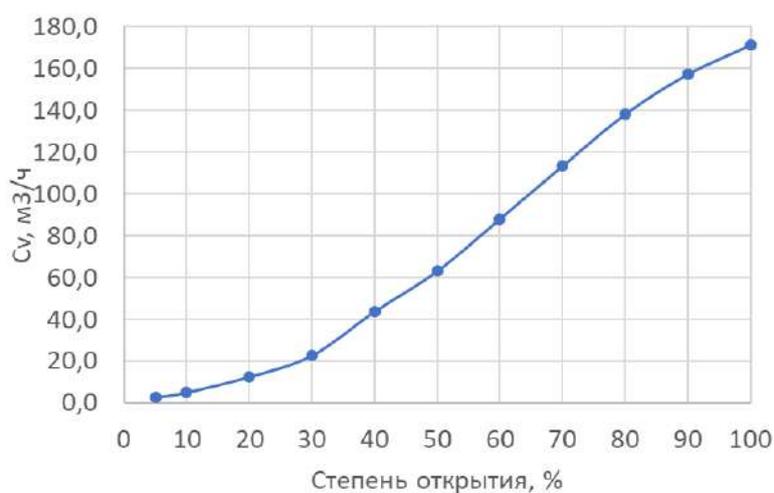
Для иллюстрации степени отклонения данных КЭ анализа и эксперимента были получены значения, которые приведены на графике (рис. 10).



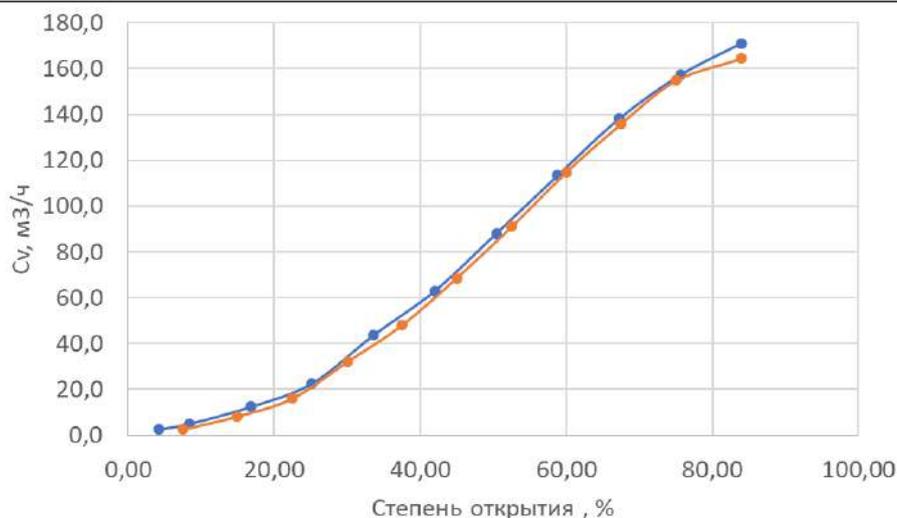
**Рис. 6.** Пропускная характеристика клапана, полученная по результатам конечно-элементного моделирования  
**Fig. 6.** The flow characteristic of the valve obtained from the results of the finite element simulation



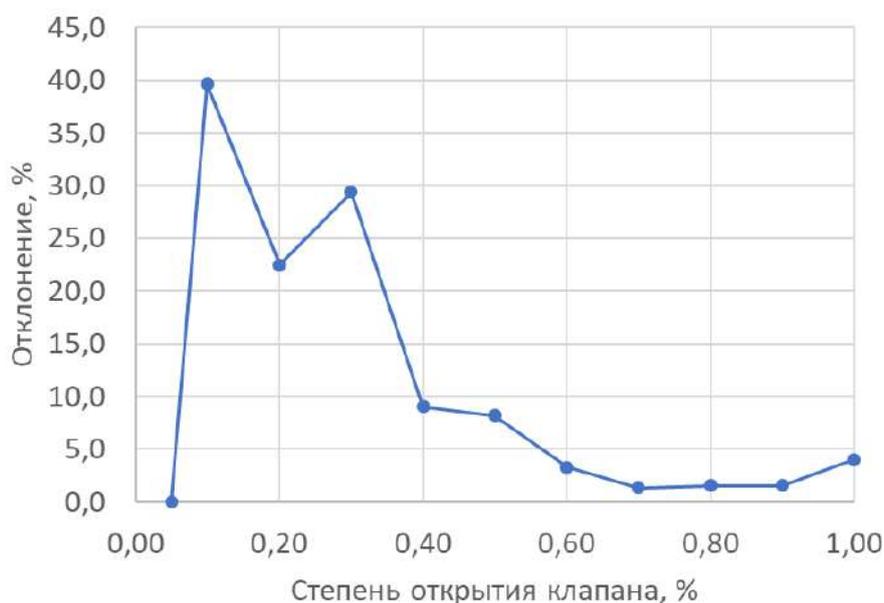
**Рис. 7.** Схема испытательного стенда  
**Fig. 7.** Test bench diagram



**Рис. 8.** Экспериментальная пропускная характеристика клапана  
**Fig. 8.** Experimental flow characteristics of the valve



**Рис. 9.** Сравнение результатов конечно-элементного анализа и экспериментальных данных  
**Fig. 9.** Comparison of the results of the finite element method analysis and experimental data



**Рис. 10.** График отклонения полученных результатов  
**Fig. 10.** Graph of deviation of the results obtained

### Закключение

В ходе проведенного исследования сделан вывод о том, что присутствует незначительное отклонение итогов КЭ анализа от результатов, полученных на испытательном стенде при степенях открытия клапана на участке 40–100 %.

На начальном этапе 0–40 % наблюдается отклонение значений в пределах 22–39 % ввиду сложности проведения анализа при низкой степени открытия клапана. По результатам расчетов и испытаний видно, что КЭ анализ необходимо и важно использовать при проектировании клапа-

нов на различных стадиях производства для снижения общих издержек. Имея в наличии необходимые вычислительные мощности, можно производить оптимизацию или модернизацию конструкции клапанов в зависимости от расчетных данных, получаемых на определенных итерациях расчетов с переработанным конструктивом.

В перспективе будут предприняты попытки для решения проблем с корреляцией результатов на участке 0–40 % при использовании инструментов математического моделирования.

Предложения по практическому применению результатов работы заключаются в их

использовании в проектировании объектов атомной и нефтегазовой промышленности. В научной работе указаны полученные расчетные и экспериментальные значения пропускной

способности, а также дана оценка возможности использования КЭ анализа при выполнении проектирования клапанов.

### Список литературы

1. Белобородов А.В., Сызранцева К.В. Использование метода конечных элементов для оценки прочностной надежности нефтегазового оборудования // Проблемы развития ТЭК Западной Сибири на современном этапе : тр. междунар. науч.-техн. конф. Тюмень, 2003. С.94–97.
2. Transient Simulation and Experiment Validation on the Opening and Closing Process of a Ball Valve used in Nuclear Power Plant / Y. Han, L. Zhou, L. Bai et al. // Nuclear Engineering and Technology. 2022. Vol. 54. Iss. 5. P. 1674–1865. DOI 10.1016/j.net.2021.10.035.
3. Корнев Е.С., Павлова Л.Д. Применение программных средств конечно-элементного анализа для решения трехмерных задач горной геомеханики // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2015. № 2. С. 126–129.
4. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Белобородов А.В. Использование метода конечных элементов для анализа конструкций трубопроводной арматуры // Нефть и газ : проблемы недропользования, добычи и транспортировки : материалы науч.-техн. конф. Тюмень, 2002. С. 130.
5. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Beloborodov A.V. Using Finite Element Analyzing for calculation of stress-strain conditions of wedge gate valves bodies // Engineering Mechanics 2003: book of extended abstracts of National conference with international participation. Prague : Czech Republic, 2003. P. 324–325. URL : <https://www.engmech.cz/improc/2003/113-Vladimir-Syzrantsev-PT.pdf> (Accessed August 3, 2023).
6. Теоретический метод управления расходом перекачиваемой среды по положению запирающих элементов трубопроводной арматуры / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук, А.П. Михиевич и др. // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 2 (87). С. 22–49.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 541 с.
8. Бате К.Д., Вилсон Е.Л. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М. : Стройиздат, 1982. 447 с.
9. Кассирова Д.М. Исследование явления автоколебания струи на выходе из воздухораспределителя с помощью программы STAR-CD // Сб. тр. второй конф. пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH. М., 2002. С. 10–12.
10. Кузнецов Е.Г., Шмелев В.В. Моделирование течения в клапане обратном подъемном DN50 PN16 и определение его гидравлических характеристик // Арматуростроение. 2007. № 1 (46). С. 44–49.
11. Tahry S.H. El. k-epsilon equation for compressible engine flows // Journal of Energy. 1983. Vol. 7, Iss. 4. P. 345–353.
12. Мойзес Б.Б., Плотнокова И.В., Редько Л.А. Статистические методы контроля качества и обработка экспериментальных данных. Томск : ТПУ, 2016. 119 с.
13. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М. : Физматлит, 2008. 364 с.
14. Zavyalov A., Zhuchkov K., Vasilchenko M. Process Pipeline Strength Calculation Methodology Enhancement Using Finite-Element Method // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 2023. Vol. 14. Iss. 2. DOI 10.1061/JPSEA2.PSENG-1401.
15. Чопоров С.В., Гоменюк С.И., Лисняк А.А. Сравнительный анализ треугольных и четырехугольных конечных элементов // Вестн. Херсон. нац. техн. ун-та. 2013. № 2 (47). С. 382–386.
16. ГОСТ 34437-2018. Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик. Введ. 2019–07–01. М. : Стандартинформ, 2018. 41 с.
17. Котельников Л.В. Моделирование потока проводимой среды в регулирующем устройстве // Вестн. Курган. гос. с.-х. акад. 2017. № 4 (24). С. 80–82.
18. Стохастическая модель процесса образования кавитационных пузырей в проточной части регулирующего клапана / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер и др. // Вестн. Иванов. гос. энергетич. ун-та. 2016. № 4. С. 24–29.

### References

1. Beloborodov A.V., Syzrantseva K.V. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov dlya otsenki prochnostnoi nadezhnosti neftegazovogo oborudovaniya [Using the finite element method to assess the strength reliability of oil and gas equipment]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Problemy razvitiya TEK Zapadnoi Sibiri na sovremennom etape»* [Proceedings of the international scientific and technical conference «Problems of the development of the fuel and energy complex of Western Siberia at the present stage»]. Tyumen', 2003, pp. 94–97.
2. Han Y., Zhou L., Bai L., Xue P., Lv W., Shi W., Huang G. Transient Simulation and Experiment Validation on the Opening and Closing Process of a Ball Valve used in Nuclear Power Plant. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, vol. 54, iss. 5, pp. 1674–1865.
3. Kornev E.S., Pavlova L.D. Primenenie programmnykh sredstv konechno-elementnogo analiza dlya resheniya trekhmernykh zadach gornoi geomekhaniki [Application of software tools of finite element analysis for solving three-dimensional problems of mining geomechanics]. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov* [High-tech technologies for the development and use of mineral resources], 2015, no. 2, pp. 126–129.
4. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Beloborodov A.V. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov dlya analiza konstruktivnykh truboprovodnoi armatury [The use of the finite element method for the analysis of pipeline valve structures].

*Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Nef't i gaz: problemy nedropol'zovaniya, dobychi i transportirovki»* [Proceedings of the Scientific and Technical Conference «Oil and gas: problems of subsurface use, production and transportation»]. Tyumen', 2002, p. 130.

5. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Beloborodov A.V. Using Finite Element Analyzing for calculation of stress-strain conditions of wedge gate valves bodies. *Engineering Mechanics 2003: book of extended abstracts of National conference with international participation. Prague : Czech Republic, 2003*, pp. 324–325. URL : <https://www.engmech.cz/improc/2003/113-Vladimir-Syzrantsev-PT.pdf> (Accessed August 3, 2023).

6. Kravchuk A.S., Kravchuk A.I., Mikhievich A.P., Gais N.Yu. Teoreticheskii metod upravleniya raskhodom perekachivaemoi sredy po polozeniyu zapirayushchikh elementov truboprovodnoi armatury [Theoretical Method for Controlling the Flow Rate of the Pumped Medium by Positioning Locking Elements of the Pipe Fittings]. *Mir transporta* [World of Transport], 2020, vol. 18, no. 2 (87), pp. 22–49.

7. Zienkiewicz O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [The finite element method in engineering science]. Moscow: Mir Publ., 1975. 541 p.

8. Bathe K.-J., Wilson E.L. Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov [Numerical methods in finite element analysis]. Moscow: Stroiizdat Publ., 1982. 447 p.

9. Kassirova D.M. Issledovanie yavleniya avtokolebaniya strui na vykhode iz vozdukhoraspredelatelya s pomoshch'yu programmy STAR-CD [Investigation of the phenomenon of self-oscillation of the jet at the outlet of the air distributor using the STAR-CD program]. *Sbornik trudov vtoroi konferentsii pol'zovatelei programmnogo obespecheniya CAD-FEM GMBH* [Proceedings of the Second Conference of CAD-FEM GMBH Software Users], Moscow, 2002, pp. 10–12.

10. Kuznetsov E.G., Shmelev V.V. Modelirovanie techeniya v klapane obratnom pod'emnom DN50 PN16 i opredelenie ego gidravlicheskiykh kharakteristik [Flow modeling in a DN50 PN16 reverse lifting valve and determination of its hydraulic characteristics]. *Armaturostroenie* [Armature construction], 2007, no. 1, pp. 44–49.

11. Tahry S.H. El. k-epsilon equation for compressible engine flows. *Journal of Energy*, 1983, vol. 7, iss. 4, pp. 345–353.

12. Moizes B.B., Plotnikova I.V., Red'ko L.A. Statisticheskie metody kontrolya kachestva i obrabotka eksperimental'nykh dannykh [Statistical methods of quality control and experimental data processing]. Tomsk: TPU Publ., 2016. 118 p.

13. Volkov K.N., Emel'yanov V.N. Modelirovanie krupnykh vikhrei v raschetakh turbulentykh techenii [Modeling of large vortices in calculations of turbulent flows]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2008. 364 p.

14. Zavyalov A., Zhuchkov K., Vasilchenko M. Process Pipeline Strength Calculation Methodology Enhancement Using Finite-Element Method. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2023, vol. 14, iss. 2. DOI 10.1061/JPSEA2.PSENG-1401.

15. Choporov S.V., Gomenyuk S.I., Lisnyak A.A. Sravnitel'nyi analiz treugol'nykh i chetyrekhugol'nykh konechnykh elementov [Comparative analysis of triangular and quadrangular finite elements]. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kherson National Technical University], 2013, no. 2 (47), pp. 382–386.

16. GOST 34437-2018. Armatura truboprovodnaya. Metodika eksperimental'nogo opredeleniya gidravlicheskiykh i kavitatsionnykh kharakteristik [State Standard 34437-2018. Pipeline valves. Technique of the experimental determination of hydraulic and cavitation characteristics]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. 41 p.

17. Kotel'nikov L.V. Modelirovanie potoka provodimoi sredy v reguliruyushchem ustroystve [Modeling of the flow of the conducted medium in a regulating device]. *Vestnik Kurganskoi GSKhA* [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy], 2017, no. 4 (24), pp. 80–82.

18. Kapranova A.B., Lebedev A.E., Meltzer A.M., Neklyudov S.V. Stokhasticheskaya model' protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyrej v protochnoi chasti reguliruyushchego klapana [Stochastic model of the process of formation of cavitation bubbles in the flow part of the control valve]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University], 2016, no. 4, pp. 24–29.

### Информация об авторах

**Буданов Вадим Андреевич**, аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: s196697@std.novsu.ru.

**Петров Николай Викторович**, аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: s225953@std.novsu.ru.

**Нозирзода Шодмон Салохидин**, аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: shoni\_1997@mail.ru.

**Петрова Екатерина Дмитриевна**, аспирантка кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: petrowa.ket@yandex.ru.

### Information about the authors

**Vadim A. Budanov**, Ph.D. Student of the Department of Industrial Technologies, Yaroslavl the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod; e-mail: s196697@std.novsu.ru.

**Nikolai V. Petrov**, Ph.D. Student of the Department of Industrial Technologies, Yaroslavl the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod; e-mail: s225953@std.novsu.ru.

**Shodmon S. Nozirzoda**, Ph.D. Student of the Department of Industrial Technologies, Yaroslavl the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod; e-mail: shoni\_1997@mail.ru.

**Ekaterina D. Petrova**, Ph. D. Student of the Department of Industrial Technologies, Yaroslavl the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod; e-mail: petrowa.ket@yandex.ru.

**Современные технологии**  
**Системный анализ**  
**Моделирование**

**№ 3 (79)**  
**2 0 2 3**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **А.П. Хоменко**  
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

Подписано в печать 31.10.2023. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 03.11.2023

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,97.

Уч.-изд. л. 13,69. Тираж 500 экз. Заказ № 3689

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно

публикуются в международной справочной системе

по периодическим и продолжающимся изданиям

«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения

Телефон: 8(3952) 63-83-57, E-mail: stsam@irgups.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Учредитель: ФГБОУ ВО "Иркутский государственный университет путей сообщения"  
(664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)