

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  
№ 4 (80)

Иркутский государственный  
университет путей сообщения

Машиностроение • Транспортные системы • Информационные технологии

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



2023 № 4(80)  
No. 4(80)

Machine Building • Transport Systems • Information Technology

# Modern technologies system analysis Modeling

2023  
No. 4 (80)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

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.

Modern technologies.  
System analysis. Modeling

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

**№ 4 (80)**

**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. 4 (80)  
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

## Транспорт

<b>Иванов Н.О., Пузина Е.Ю.</b> Направления разработки эффективной системы управления электроприводом насосной станции .....	8
<b>Синицын В.В., Петров Г.И.</b> Условия применения максимально возможной толщины тормозных колодок в тормозной системе тележки грузового вагона с цилиндрами 670В .....	17
<b>Чубарова И.А., Доможирова А.Д.</b> Построение модели организации потоков пассажиров на вокзальном комплексе .....	27
<b>Тюньков В.В., Воронова Ю.В., Мартыненко Л.В., Солонго Болдбаатар</b> Фактор технологической прецизионности в алгоритме конструктивной эволюции буксового узла грузовых вагонов .....	39
<b>Асалханова Т.Н., Давтян А.М.</b> Построение модели организации потоков пассажиров на вокзальном комплексе .....	54
<b>Лакин И.И., Семченко В.В.</b> Применение теории массового обслуживания и сетей Петри при анализе параметров системы обслуживания тягового подвижного состава методом математического моделирования .....	65
<b>Нечипорук М.В., Анисимов В.А.</b> Методика принятия проектных решений по изменению облика и мощности мультимодального транспортного узла .....	78
<b>Бирюков А.Э., Сорокин Д.Г., Лысов Н.В., Ситников М.С.</b> Диагностический алгоритм анализа тока асинхронных электродвигателей, основанный на методиках оценки годографа и частотного спектра .....	88
<b>Гренкевич О.О., Калидова А.Д.</b> Оценка эффективности инвестиций в проекты для компаний железнодорожного транспорта .....	102
<b>Овчинников Д.В.</b> Новые подходы к моделированию устойчивости бесстыкового пути в среде конечно-элементного анализа .....	112
<b>Корсун А.А.</b> Исследование газодинамических процессов в электропневматических тормозах на электропоезде ЭД9М .....	123
<b>Трескин С.В., Емельянов Д.О., Иванов П.Ю., Дульский Е.Ю.</b> Моделирование распределения тепловых полей на поверхностях трения композиционных тормозных накладок дисковых тормозов железнодорожного подвижного состава .....	134
<b>Власова Н.В., Оленцевич В.А.</b> Ключевые аспекты функционирования динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «Российские железные дороги» .....	148

## Информационные технологии, управление и обработка

<b>Лукьянов А.В., Перелыгина А.Ю., Каимов Е.В.</b> Исследование распределения вибрации и дефектов вспомогательных машин электровозов .....	159
--	-----

## CONTENTS

### Transport

<b>Ivanov N.O., Puzina E.Yu.</b> Directions for the development of an effective control system for a pumping station electric drive .....	8
<b>Sinitsyn V.V., Petrov G.I.</b> Conditions for the use of the maximum possible thickness of brake pads in the braking system of a freight wagon trolley with 670V cylinders .....	17
<b>Chubarova I.A., Domozhirova A.D.</b> Building of a Model for Organizing Passenger Flows at the Station Complex .....	27
<b>Tyun'kov V.V., Voronova Yu.V., Martynenko L.V., Solongo Boldbaatar</b> Factor of technological precision in the algorithm of constructive evolution of the axle box unit of freight wagons .....	39
<b>Asalkhanova T.N., Davtyan A.M.</b> Construction of railway track digital twins using mobile diagnostic tools .....	54
<b>Lakin I.I., Semchenko V.V.</b> Application of queuing theory and Petri nets in the analysis of traction rolling stock maintenance parameters by mathematical modeling .....	65
<b>Nechiporuk M.V., Anisimov V.A.</b> Methodology of making design decisions to change the appearance and capacity of a multimodal transport hub .....	78
<b>Biryukov A.E., Sorokin D.G., Lysov N.V., Sitnikov M.S.</b> Diagnostic algorithm for analysis of induction motors current based on a hodograph estimation of the generalized current vector and frequency spectra .....	88
<b>Grenkevich O.O., Kalidova A.D.</b> Evaluating the efficiency of investment in a project for railway transport companies .....	102
<b>Ovchinnikov D.V.</b> New approaches to modeling the stability of a long-welded rails in the environment of finite element analysis .....	112
<b>Korsun A.A.</b> Research of gas dynamic processes in electro pneumatic brakes on an electric train ED9M .....	123
<b>Treskin S.V., Emel'yanov D.O., Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu.</b> Modeling of thermal fields distribution on the friction surfaces of composite brake linings of railway rolling stock disk brakes .....	134
<b>Vlasova N.V., Olentsevich V.A.</b> Key aspects of the functioning of the dynamic model of loading the JSC «Russian Railways» infrastructure.....	148

### Information technology, management and processing

<b>Luk'yanov A.V., PereLygina A.Yu., Kaimov E.V.</b> Research of vibration distribution and defects of auxiliary machines in electric locomotives .....	159
---	-----

**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.irgups.ru

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@rgups. ru

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ТРАНСПОРТ**

**TRANSPORT**



## Направления разработки эффективной системы управления электроприводом насосной станции

Н.О. Иванов<sup>1</sup>, Е.Ю. Пузина<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉lena-rus05@mail.ru

### Резюме

В системах электроснабжения потребителей постоянного тока достаточно часто используются выпрямительные установки. При этом могут возникать такие проблемы, как увеличенное сечение токоведущих частей в случае отсутствия стабилизации напряжения, искажение качества электрической энергии, сопровождающееся дополнительными ее потерями из-за появления высших гармоник. Также следует учитывать, что современные двигатели постоянного тока остро реагируют на искажение формы кривой питающего напряжения. Актуальной задачей является разработка выпрямительного устройства, которое способно подвести к электроприемникам электрическую энергию необходимого качества при соблюдении требований по надежности работы электрооборудования. В статье предложено использовать для управления электроприводом постоянного тока трехконтурную систему регулирования, включающую датчики положения ротора. Сигналы, снимаемые с указанного датчика, непосредственно поступают в систему управления данных двигателей. При этом основным предложенным техническим решением является регулируемое выпрямительное устройство на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем. С целью исследования процессов, происходящих в устройстве, рекомендовано применение метода математического моделирования с уравнениями, составленными на основе теории электрических цепей с взаимной индуктивностью. Произведен расчет переходных процессов, происходящих при коммутации нагрузки и при различных видах несимметрии питающего напряжения. Полученные результаты расчета подтвердили эффективность использования трансформатора с вращающимся магнитным полем и датчика положения ротора для создания рабочей системы управления электроприводом постоянного тока.

### Ключевые слова

цифровое моделирование, математическое моделирование, магнитопроводы, бесконтактные двигатели

### Для цитирования

Иванов Н.О. Направления разработки эффективной системы управления электроприводом насосной станции / Н.О. Иванов, Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4(80). С. 8–16. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).8-16.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 05.12.2023 г.; поступила после рецензирования: 08.12.2023 г.; принята к публикации: 11.12.2023 г.

## Directions for the development of an effective control system for a pumping station electric drive

N.O. Ivanov<sup>1</sup>, E.Yu. Puzina<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

### Abstract

In power supply systems for direct current consumers rectifier installations are often used. In such cases, problems such as an increased cross-section of current-carrying parts in the absence of voltage stabilization, distortion of the quality of electrical energy, accompanied by additional losses of electricity due to the appearance of higher harmonics, may arise. It should also be borne in mind that modern DC motors are acutely sensitive to distortion of the shape of the supply voltage curve. Therefore, an urgent task is to develop a rectifier device that is able to supply electrical energy of the required quality to electric receivers while meeting the requirements for the reliability of electrical equipment. In this paper, it is proposed to use a three-circuit control system for controlling a DC electric drive, including rotor position sensors. The signals taken from the above sensor are directly fed into the control system of these engines. At the same time, the main technical solution proposed in the article is an adjustable rectifier device based on a transformer with a rotating magnetic field. In order to study the processes occurring in the proposed device, the use of mathematical modeling method is suggested using equations based on the theory of electric circuits with mutual inductance. The calculation of transients occurring during load switching and under various types of asymmetry of the supply voltage is performed. The obtained calculation results confirmed the effectiveness of using a transformer with a rotating magnetic field and a rotor position sensor to create an effective control system for a DC electric drive.

**Keywords**

digital modeling, mathematical modeling, magnetic circuits, contactless motors

**For citation**

Ivanov N.O., Puzina E.Yu. Napravleniya razrabotki effektivnoi sistemy upravleniya elektroprivodom nasosnoi stantsii [Directions for the development of an effective control system for a pumping station electric drive]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 8–16. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).8-16.

**Article Info**

Received: December 5, 2023; Revised: December 8, 2023; Accepted: December 11, 2023.

**Введение**

Потребность в совершенствовании систем электроснабжения (СЭС) вызвана непрерывным увеличением числа и мощности приемников электрической энергии, расширением и усложнением решаемых ими задач. От надежности работы систем электроснабжения во многом зависят качество подводимой электроэнергии и надежность работы потребителей электрической энергии [1–6]. Из-за нестабильности параметров электроэнергии имеют место до 20 % сбоев и отказов в работе систем различного оборудования [7–14].

В СЭС современных энергоустановок, где источником питания являются выпрямительные устройства (ВУ), стабилизация их выходного напряжения нередко отсутствует [15, 16]. Данный факт приводит к необходимости выбора сечения токоведущих частей в системах электроснабжения с учетом минимально возможного значения нестабилизированного напряжения, соответственно приходится принимать завышенное сечение, что удорожает электрические сети. Процесс работы ВУ, состоящей из дискретного количества полупроводниковых приборов, поочередно проводящих ток, приводит к искажению кривой питающего переменного напряжения, что отрицательно влияет на качество электрической энергии, получаемой потребителями в этих сетях.

Для приводов механизмов насосных станций применяются электродвигатели постоянного тока, поставляемые с необходимым оборудованием.

Если рассмотреть регулируемый электропривод с электродвигателями постоянного тока, то стоит отметить, что одним из их слабых узлов является щеточно-коллекторный аппарат, поскольку практика эксплуатации подобных двигателей подтвердила его относительную ненадежность. В связи с этим, например, в СЭС насосного оборудования к настоя-

щему времени произошло вытеснение двигателей постоянного тока с щеточно-коллекторным узлом на бесконтактные двигатели постоянного тока.

В рамках данного исследования поставлена цель разработки системы управления электроприводом постоянного тока, поэтому на начальном этапе рассмотрим общие принципы его работы и основы организации систем его управления.

**Постановка задачи исследования**

В основе принципа действия электродвигателя постоянного тока лежит закон Ампера, который, согласно [17], устанавливает зависимость силы  $F$ , действующей на проводник с током, в магнитном поле, от значения магнитной индукции данного поля  $B$ , величины тока в проводнике  $i$ , длины проводника  $l$ , а также угла  $\alpha$  между направлениями тока и магнитной индукции:

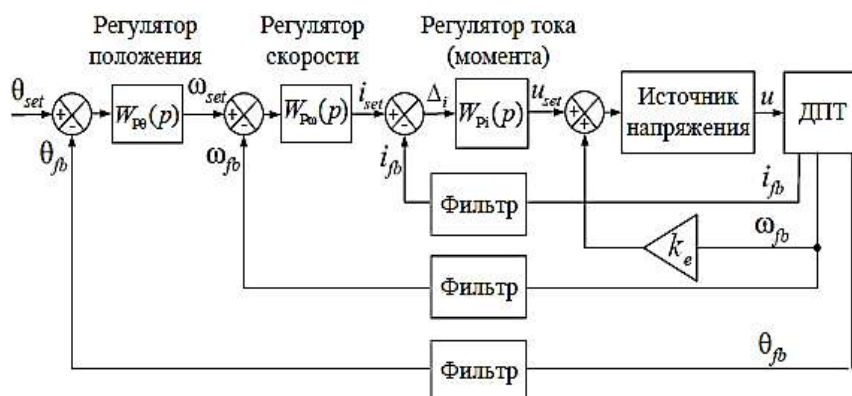
$$F = i \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha.$$

Направление данной силы  $F$  определяют согласно правилу левой руки.

При дальнейшем рассмотрении материала будем учитывать определенные допущения. В частности, примем, что в статоре исследуемого электродвигателя магнитное поле между полюсами остается однородным и постоянным.

С целью управления двигателем постоянного тока (ДПТ) предлагается рассмотреть для использования трехконтурную систему регулирования положения вала двигателя (рис. 1).

При этом необходимо выполнить расчет параметров регулятора. Если вести речь о цифровых системах автоматического регулирования, то необходимо правильно выбрать метод расчета. Использование метода последовательной коррекции не оправдано, поскольку при применении ряда допущений, которые не позволяют учесть влияние ряда факторов на работу ДПТ, получаем результаты расчета с большой погрешностью.



**Рис. 1.** Система трехконтурной системы регулирования:

$\theta_{set}$ ,  $\omega_{set}$ ,  $i_{set}$ ,  $\Delta i$ ,  $u_{set}$  – регулируемые координаты;  $\theta_{fb}$ ,  $\omega_{fb}$ ,  $i_{fb}$  – возмущения;  
ДПТ – двигатель постоянного тока;  $k_e$  – коэффициент электродвижущей силы

**Fig. 1.** Three-circuit control system:

$\theta_{set}$ ,  $\omega_{set}$ ,  $i_{set}$ ,  $\Delta i$ ,  $u_{set}$  – adjustable coordinates;  $\theta_{fb}$ ,  $\omega_{fb}$ ,  $i_{fb}$  – disturbances;  
ДПТ – DC motor;  $k_e$  – electromotive force coefficient

Метод численного моделирования создает условия для получения более точных результатов в области исследования режимов работы и взаимодействия контуров трехконтурной системы регулирования.

Процесс работы данной системы управления ДПТ должен строиться на принципе последовательной работы контуров: первым настраивается внутренний контур тока, далее контур скорости и только последним контур положения. Такой принцип подчиненного регулирования лежит в основе предлагаемой системы управления.

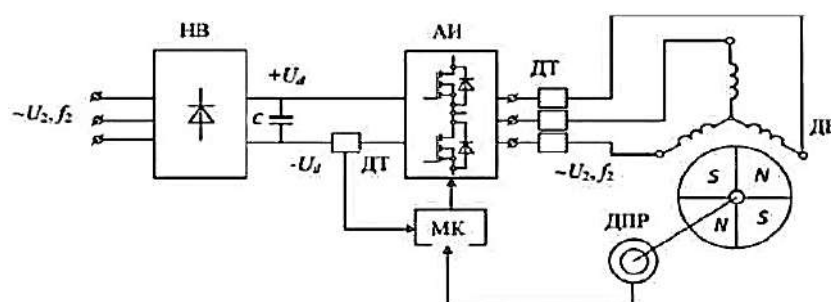
При разработке системы управления бесконтактными ДПТ необходимо решить такую актуальную задачу, которая связана с применением ВУ, а именно, предложить использовать такие ВУ, которые не должны вызывать суще-

ственных искажений кривой напряжения, подводимого к исследуемым двигателям, и соответствовать требованиям по надежности их электроснабжения. И также для бесконтактных двигателей постоянного тока: для улучшения их работы должны применяться датчики положения ротора определенной конструкции.

Отдельно стоит остановиться на датчике положения ротора (ДПР), используемом в так называемом «бесконтактном ДПТ» (рис. 2).

Данный датчик встраивается в двигатель. Он имеет три канала по числу фаз в статорной обмотке бесконтактного двигателя постоянного тока.

В каждом канале формируется форма выходного сигнала в виде меандра. При этом количество импульсов меандра напрямую зависит



**Рис. 2.** Датчик положения ротора бесконтактного двигателя постоянного тока:

НВ – неуправляемый выпрямитель; ДТ – датчики тока; АИ – автономный инвертор напряжения;  
ДБ – синхронный электродвигатель с постоянными магнитами; ДПР – датчик положения ротора;  
МК – микроконтроллер

**Fig. 2.** Rotor position sensor of contactless DC motor:

НВ – uncontrolled rectifier; ДТ – current sensors; АИ – autonomous voltage inverter; ДБ – synchronous electric motor with permanent magnets; ДПР – rotor position sensor; МК – microcontroller

от числа пар полюсов ДПТ. Угловой сдвиг между импульсами в каналах составляет одну треть периода. Это связано с поворотом поля ротора на  $120^\circ$ . Логическая обработка данных сигналов позволяет выявить электрическое положение поля ротора с точностью до  $60^\circ$ .

Сигналы с датчика положения ротора непосредственно используются системой управления бесконтактного двигателя постоянного тока.

С целью формирования импульсов датчика положения ротора возможно использовать различные устройства, такие как зубчатые колеса с измерителями индуктивности или оптоволоконные пары.

В данной статье предлагается рассмотреть эту актуальную для отечественных систем электроснабжения проблему качественного управления электроприводом на базе бесконтактного двигателя постоянного тока, путем разработки регулируемого выпрямительного устройства, с применением трансформатора с вращающимся магнитным полем (ВМП).

### **Математическое описание процесса моделирования**

Рассмотрим процесс моделирования трансформатора с ВМП.

Одним из эффективных способов изучения объекта или процесса является математическое моделирование. Благодаря данному способу удается провести исследование свойств объекта, установить закономерности течения процессов, не вмешиваясь в работу объекта или системы. В нашем случае важно исследовать различные режимы работы трансформатора с ВМП [18], особенно с учетом влияния на них рабочих коммутационных процессов, аварийных режимов и режимов, связанных с несимметрией и несинусоидальностью напряжения питания.

Разработка математических моделей трансформатора с ВМП может быть выполнена с применением положений теории магнитного поля или теории электрических цепей [19, 20].

Рассматривая элементы электрической цепи, принято подразделять их на пассивные и активные. Активными называют элементы, имеющие в необходимом объеме источники электрической энергии. К их характеристикам относятся: номинальное напряжение источника электродвижущей силы, нагрузка номинального тока источника тока, значение сопротивления. Пассивными

называют элементы, в которых энергия электромагнитного поля только накапливается или рассеивается. К их наиболее важным характеристикам относят значения сопротивления или проводимости. Для моделирования активных и пассивных элементов используют их характеристики, описываемые алгебраическими или дифференциальными уравнениями.

Также применяют такую классификацию элементов электрической цепи, как их подразделение на линейные и нелинейные. В том случае, когда при изменении тока, протекающего по элементам, их параметры не изменяются, такие компоненты называют линейными. Если же параметры элементов зависят от протекающего по ним тока, то они относятся к нелинейным. Математическое моделирование линейных элементов подразумевает применение линейных дифференциальных или алгебраических уравнений. Моделирование нелинейных элементов сложнее. В этом случае используется алгоритмическое моделирование, представляемое в форме алгоритма, перерабатывающего заданный набор входных данных в заданный набор выходных. Как известно, такие виды моделей приходится использовать в ситуации, когда применение указанных выше аналитических моделей затруднено либо нецелесообразно.

В настоящее время, согласно [19, 20], в отдельных случаях применяются математические модели трансформаторов, основанные на теории магнитного поля, но, как показывает практика исследований, более распространенными являются модели, основанные на теории электрических цепей с учетом взаимной индуктивности. При этом важной задачей является правильный выбор системы координат для записи уравнений, используемых в математической модели. Так, если применять систему подвижных прямоугольных координат  $d, q, 0$ , то будет достаточно сложно исследовать режимы работы трансформатора с ВМП, характеризующиеся несимметрией и несинусоидальностью напряжения, в том числе и несимметричные аварийные режимы.

В случае же использования осей фазной неподвижной системы координат  $A, B, C, \dots, 0$  для описания процессов в трансформаторе с ВМП удастся, согласно [21], существенно проще описать и исследовать все виды несимметричных режимов работы данного трансформатора. При этом необходимо принять ряд допущений, которые позволят упростить модель, но не окажут

существенного влияния на ее точность:

– насыщение стали сердечника и потери в нем для трансформатора с ВМП не учитываем;

– обмотки моделируемого трансформатора обладают симметрией и их магнитные поля синусоидальны;

– сердечник трансформатора с ВМП имеет равномерные воздушные зазоры;

– обмотка подмагничивания шунта исследуемого трансформатора обладает неизменной индуктивностью;

– не учитываем наличие потокоцепления обмотки подмагничивания шунта с вращающимся магнитным полем.

С учетом полученных допущений сформирована схема замещения трансформатора с ВМП (рис. 3).

Схема содержит  $k$ -е количество фаз первичной обмотки,  $n$ -е – вторичной обмотки и обмотку подмагничивания шунта.

Процессы, происходящие в приведенной схеме исследуемого трансформатора описываются, согласно [21], следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_k = \frac{d\Psi_k}{dt} + r_1 i_k; \\ 0 = \frac{d\Psi_n}{dt} + (r_2 + r_n) i_n; \\ U_{оп} = \frac{d\Psi_{оп}}{dt} + r_{оп} i_{оп}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u_k$  – значение фазного питающего напряже-

ния;  $i_k$  – мгновенное значение фазного тока первичной обмотки;  $r_1$  – активное сопротивление фазы первичной обмотки;  $r_2$  – активное сопротивление фазы вторичной обмотки;  $r_n$  – активное сопротивление нагрузки;  $i_n$  – мгновенное значение фазного тока вторичной обмотки;  $U_{оп}$  – напряжение обмотки подмагничивания шунта;  $i_{оп}$  – ток подмагничивания;  $r_{оп}$  – активное сопротивление обмотки подмагничивания;  $\Psi_k$  – потокоцепление фазы первичной обмотки, которое определяют по формуле:

$$\Psi_k = \sum_{i=1}^{k+n} M_i i_i \cos \alpha_i,$$

где  $\alpha_i$  – угол между осями фаз обмоток;  $\Psi_n$  – потокоцепление фазы вторичной обмотки, которое рассчитывают по формуле:

$$\Psi_n = \sum_{i=1}^{k+n} M^2 i_n \cos \alpha_i,$$

где  $\Psi_{оп}$  – потокоцепление обмотки подмагничивания, определяемое по формуле  $\Psi_{оп} = L_{оп} \cdot i_{оп}$ .

Общее количество дифференциальных уравнений в системе (1), относящейся к жестким, составляет  $n + k + 1$ . Считаем, что она адекватно описывает процессы в трансформаторе с ВМП.

Решение данной системы произведем в матричной форме:

$$U_m = L_m \frac{dI_m}{dt} + R_m I_m, \quad (2)$$

где  $U_m = [u_A, u_B, u_C, 0, \dots, 0, U_{оп}]^T$  – матрица-столбец напряжений;  $I_m = [i_A, i_B, i_C, i_a, \dots, i_n,$

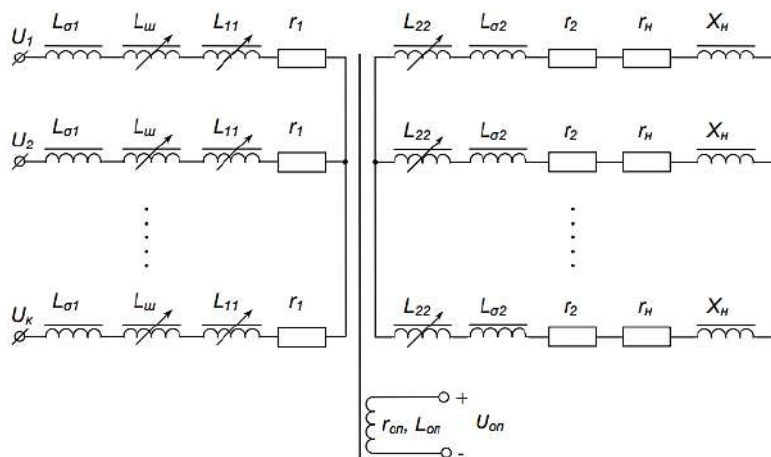


Рис. 3. Схема замещения трансформатора с вращающимся магнитным полем с учетом принятых допущений:

$L$  – индуктивный элемент;  $r$  – резистивный элемент

Fig. 3. Replacement scheme of a transformer with a rotating magnetic field, taking into account the accepted assumptions:

$L$  – inductive element;  $r$  – resistive element

$i_{\text{оп}}]^T$  – матрица-столбец токов;  
 $\frac{dI_m}{dt} = [i'_A, i'_B, i'_C, i'_a, \dots, i'_n, i'_{\text{оп}}]^T$  – матрица-столбец

производных от токов;  $L_m$  – квадратная матрица индуктивностей размера  $(k + n + 1)$ ;  $R_m = \text{diag} [r_1, r_1, r_1, r_2 + r_H, \dots, r_2 + r_H, r_{\text{оп}}]$  – диагональная матрица активных сопротивлений.

Представим формулу (2) в форме Коши для того, чтобы выполнить ее интегрирование:

$$\frac{dI_m}{dt} = L_m^{-1} U_m - L_m^{-1} R_m I_m,$$

где  $L_m^{-1}$  – матрица, обратная матрице  $L_m$ .

Материалы исследований, представленные в [20, 22], позволяют сделать вывод о целесообразности решения приведенных систем уравнений путем их численного интегрирования с применением относительных единиц. Такой подход обеспечивает сокращение временных затрат на проведение данных операций и, согласно [22], создает условия в соответствии с критериями подобия для интерпретирования результатов моделирования на трансформаторы с ВМП разной мощности.

Для применения системы относительных единиц, согласно [21], в описании процессов, происходящих в первичной обмотке исследуемого трансформатора, разделим каждый член уравнения на полное сопротивление фазы первичной обмотки  $Z_{61}$ :

$$Z_{61} = U_{1i}/I_{1i}.$$

Для вторичной обмотки трансформатора с ВМП используем деление каждого члена уравнения на полное сопротивление фазы вторичной обмотки  $Z_{62}$ :

$$Z_{62} = U_{2i}/I_{2i}. \quad (5)$$

Если же исследуемый трансформатор будет иметь разное число фаз первичной и вторичной обмоток, то требуется выразить полное сопротивление фазы вторичной обмотки  $Z_{62}$  через полное сопротивление фазы первичной обмотки  $Z_{61}$ . При этом за базовое значение сопротивления вторичной обмотки  $Z_{62}$  будет принят положительный корень квадратного уравнения:

$$A \cdot Z_{62}^2 + B \cdot Z_{62} + C = 0, \quad (6)$$

где

$$A = Z_{61}^2 \cdot K^2 \cdot I_{\mu\text{н}}^2 \cdot K_{\text{я}i}^2 - E_{11\text{н}}^2 \cdot K^2;$$

$$B = Z_{61}^2 \cdot K_{\text{я}i}^2 \cdot K \cdot n \cdot U_{2i} \cdot I_{\mu\text{н}} \cdot \cos \beta;$$

$$C = Z_{61}^2 \cdot K_{\text{я}i}^4 \cdot U_{2i}^2 \cdot n^2;$$

$$\beta = 90^\circ + \alpha,$$

где  $I_{\mu\text{н}}$  – значение номинального намагничивающего тока;  $E_{11\text{н}}$  – номинальная ЭДС взаимной индукции фазы первичной обмотки;  $K_{\text{я}i} = \Phi_{2i}/\Phi_{1i}$  – отношение номинального значения магнитного потока вторичного яра к потоку первичного яра;  $\beta$  – угол между векторами.

После выполнения всех необходимых преобразований матрицы  $R_m$ ,  $dI_m$ ,  $dt$  и  $I_m$  по своему виду не изменятся, матрица  $U_m$  запишется в виде:

$$U_m = [1, 1, 1, 0, \dots, 0, 0_n]^T. \quad (7)$$

Далее каждый элемент матрицы  $L_m$  умножим на угловую частоту  $2\pi f$ . Полученную по результатам всех действий матрицу  $L_m$  обозначим  $X_m$  – матрица индуктивных сопротивлений.

Весь ход преобразований привел к следующему виду системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в трансформаторе с ВМП:

$$\frac{dI_m}{d\tau} = X_m^{-1} U_m - X_m^{-1} R_m I_m, \quad (8)$$

где  $\tau = 2\pi f \cdot t$  – относительное время.

На рис. 4 приведены кривые напряжения вторичной обмотки трансформатора с ВМП, характерные для переходных процессов, возникающих при коммутации нагрузки (а) и при несимметрии по фазе и амплитуде (б). Данные кривые получены в процессе реализации предложенного алгоритма, согласно которому осуществлена замена математической модели трансформатора с ВМП, организованной в соответствии с уравнениями теории магнитного поля на математическую модель, базирующуюся на более простых уравнениях, в основе которых лежит теория электрических цепей с взаимной индуктивностью.

Стоит отметить также, что временные затраты, связанные с решением путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений трансформатора с ВМП с использованием фазной системы координат больше, чем при интегрировании уравнений аналогичной системы в осях  $d, q, 0$ . Этот факт относится к негативным характеристикам данного способа. Но его несомненным достоинством являются значительно более широкие возможности исследования несимметричных режимов работы трансформатора с ВМП.

При исследовании несимметричных режимов работы трансформатора с ВМП будем считать, что количество витков вторичных обмоток и первичных обмоток одинаково, т.е. коэффициент трансформации напряжения фазных

величин практически равен 1. Это не нарушает приведенные рассуждения, но позволяет создавать на первом этапе более простые модели.

Так как схема замещения трансформатора похожа для токов прямой и обратной последовательностей, то при анализе несимметричных режимов его работы можно не рассматривать отдельно напряжения и токи этих последовательностей, а брать их за основу [23]. Метод симметричных составляющих используется в основном для исследования несимметричных режимов работы трансформаторов с ВМП и электрических машин насосного оборудования, а также режимов, возникающих при коротком замыкании. При несимметрии пускового напряжения, характерной для электроприводов насосной станции, используется разделение этого напряжения на симметричные напряжения обратной и прямой последовательностей.

Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что при подключении обмоток трансформатора по схеме «звезда» с нейтралью токи нулевой последовательности могут протекать непосредственно во вторичной обмотке. Также следует учитывать основное отличие различных преобразователей от трансформаторов – это наличие повременного механического перемещения вращающихся относительно друг друга обмоток, а значит, и совместных индуктивностей, что позволяет проектировать преобразователи электрической энергии различных параметров в другие, при этом возможно изменение тока, напряжений и частоты одновременно.

В завершение хотелось бы отметить, что применение структурирования является наиболее

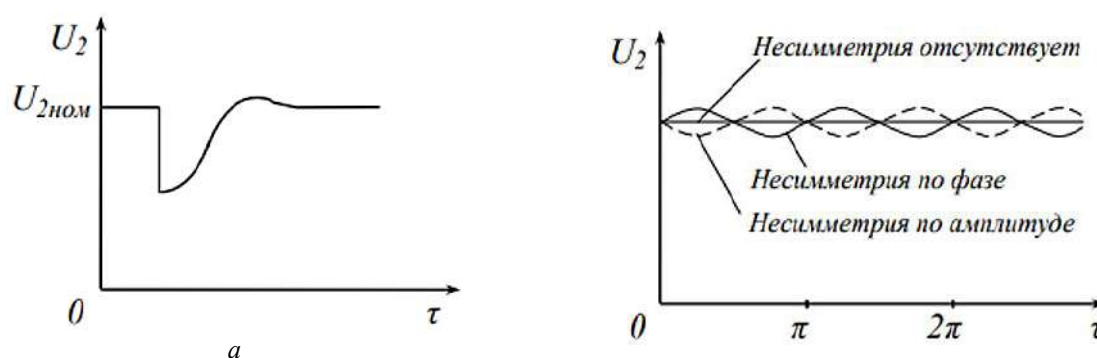
эффективным и экономически выгодным методом. Например, перераспределение или изменение всех однофазных нагрузок насосного оборудования на насосной станции равномерно между всеми фазами может существенно уменьшить несимметрию параметров режима работы. Кроме того, можно снизить несимметрию режима работы трансформатора с ВМП, организовав ступени соединения между трансформаторами с ВМП.

### Заключение

Таким образом, используя трансформатор с ВМП для обеспечения качественного электрического поля, которое не имеет высших гармонических составляющих, влияющих на работу электрической машины привода, а также применяя трехконтурную систему регулирования положения вала двигателя, можно добиться эффективного управления электроприводами насосных станций.

При этом предложено рассмотреть для использования в трехконтурной системе регулирования положения вала двигателя современных датчиков положения ротора электрической машины, сигналы с которых непосредственно используются системой управления бесконтактного двигателя постоянного тока.

Применение предложенного алгоритма исследования несимметричных режимов работы трансформаторов с ВМП позволяет наиболее эффективно разработать конструктивные и массогабаритные параметры базовой машины привода, предложить наиболее оптимальный вариант структуры системы его управления.



**Рис. 4.** Кривые напряжения вторичной обмотки трансформатора с вращающимся магнитным полем, характерные для переходных процессов:

*a* – при коммутации нагрузки; *b* – несимметрия по фазе и амплитуде

**Fig. 4.** Voltage curves of the secondary winding of a rotating transformer magnetic field, characteristic for transient processes:  
*a* – when switching the load; *b* – asymmetry in phase and amplitude

## Список литературы

1. Пузина Е.Ю., Худоногов И.А. Выявление факторов разрыва транзита электроэнергии в системе внешнего электроснабжения и ее подпитки через контактную сеть // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2023. № 2 (58). С. 67–76.
2. Селезнёв 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.
3. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. М. : МЭИ, 2006. 319 с.
4. Третьяков Е.А. Управление качеством электрической энергии в распределительных сетях железных дорог. Омск : ОмГУПС, 2013. 191 с.
5. Овечкин И.С., Пузина Е.Ю. Снижение несимметрии напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2023. № 4 (60). С. 84–95.
6. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018. P. 1–5. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
7. Shamanov V.I., Pulyakov A.V., Trofimov Yu.A. Main electromagnetic jammer sources with impact on the railroad automation systems // Journal of Physics: International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020). 2020. Vol. 1661. Is. 1. DOI 10.1088/1742-6596/1661/1/012012.
8. Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Попов М.О. Инновационные методы анализа основных компонент для оценки и диагностики состояния контактной сети // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2023. С. 50–53.
9. Рыжова Е.Л. Инновационные технологии определения состояния изоляции тяговых электрических машин // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 1 (17). С. 116–127.
10. Сулейманов Р.Я., Падерина И.Б. Особенности ускорения подвижного состава // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 1 (45). С. 75–81.
11. Определение современных показателей надежности устройств релейной защиты и автоматики / А.В. Виноградов, А.А. Лансберг, Ю.Д. Волчков и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 2. С. 58–70.
12. Reliability analysis of power equipment of traction rolling stock within the Eastern region / А.М. Khudonogov, I.A. Khudonogov, E.Yu. Dul'skiy et al. // International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019). Moscow, 2019. Vol. 760. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012018.
13. Плотников И.И. Обнаружение неисправностей в системе тягового электроснабжения // Железнодорожный транспорт. 2023. № 8. С. 45–47.
14. Усовершенствование схемы блока управления электродвигателя малогабаритного стрелочного универсального / К.В. Менакер, А.В. Пульпяков, М.В. Востриков и др. // Автоматика на транспорте. 2023. № 4. Т. 9. С. 313–323.
15. Пузина Е.Ю. Регулируемые тяговые преобразователи в системе электроснабжения постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1998. 24 с.
16. Овечкин И.С., Поляков М.М. Изменение сигнала на выходе линейного колебательного контура при приближении частоты к резонансной // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 372–382. URL : [https://mnv.irkgups.ru/sites/default/files/articles\\_pdf\\_files/ovechkin\\_polyakov.pdf](https://mnv.irkgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/ovechkin_polyakov.pdf) (Дата обращения 18.11.2023).
17. Основы электротехники, микроэлектроники и управления. Теория и расчет. В 2 т. / Ю.А. Комиссаров, Л.С. Гордеев, Д.П. Вент и др. Т. 1. М. : Химия, 2007. 451 с.
18. Красношапка М.М., Коваленко Г.А., Красношапка Д.М. Плавно регулируемые трансформаторы и автотрансформаторы с вращающимся магнитным полем. Киев : ИЭД, 1986. 49 с.
19. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высш. шк., 1987. 248 с.
20. Страхов С.В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1960. 247 с.
21. Мишин С.В., Мишина И.В. Математическое моделирование управляемого трансформатора с вращающимся магнитным полем // Науч. вестн. Москов. гос. техн. ун-та граждан. авиации. 2008. № 126. С. 87–91.
22. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). М. : Высш. шк., 1984. 438 с.
23. Петров Г.Н. Трансформаторы. Т. 1. Основы теории. М.-Л. : Энергоиздат, 1934. 446 с.

## References

1. Puzina E.Yu., Khudonogov I.A. Vyyavlenie faktorov razryva tranzita elektroenergii v sisteme vneshnego elektrosnabzheniya i ee podpitki cherez kontaktnuyu set' [Identification of factors that disrupt the transit of electricity in the external power supply system and its replenishment through the contact network]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2023, no. 2 (58), pp. 67–76.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Ovechkin I.S., Puzina E.Yu. Snizhenie nesimmetrii napryazheniya vozdushnykh linii, pitayushchikh ustroystva avtoblokirovki [Reducing the voltage asymmetry of overhead lines supplying automatic blocking devices]. *Vestnik Ural'skogo gosudar-*



*svennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2023, no. 4 (60), pp. 84–95.

6. 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.

7. Shamanov V.I., Pulyakov A.V., Trofimov Yu.A. Main electromagnetic jammer sources with impact on the railroad automation systems. *Journal of Physics: International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020)*, 2020, vol. 1661, is. 1. DOI 10.1088/1742-6596/1661/1/012012.

8. Bykadorov A.L., Zarutskaya T.A., Popov M.O. Innovatsionnye metody analiza osnovnykh komponent dlya otsenki i diagnostiki sostoyaniya kontaktnoi seti [Innovative methods of analysis of the main components for assessing and diagnosing the state of the contact network]. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Energetika transporta. Aktual'nye problemy i zadachi»* [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference «Energy of transport. Current problems and challenges»]. Rostov-on-Don, 2023, pp. 50–53.

9. Ryzhova E.L. Innovatsionnye tekhnologii opredeleniya sostoyaniya izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin [Innovative technologies for determining the insulation state of traction electrical machines]. *Intellektual'naya elektrotehnika* [Intelligent electrical engineering], 2022, no. 1 (17), pp. 116–127.

10. Suleimanov R.Ya., Paderina I.B. Osobennosti uskoreniya podvizhnogo sostava [Features of rolling stock acceleration]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2020, no. 1 (45), pp. 75–81.

11. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Volchkov Yu.D., Vinogradova A.V. Opredelenie sovremennykh pokazatelei nadezhnosti ustroystv releinoi zashchity i avtomatiki [Determination of modern indicators of reliability of relay protection and automation devices]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [Bulletins of higher educational organizations. Energy problems], 2023, vol. 25, no. 2, pp. 58–70.

12. Khudonogov A.M., Khudonogov I.A., Dul'skii E.Y., Ivanov P.Y., Lobytsin I.O., Khamnaeva A.A. Reliability analysis of power equipment of traction rolling stock within the Eastern region. *International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019)*. Moscow, 2019, vol. 760. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012018.

13. Plotnikov I.I. Obnaruzhenie neispravnosti v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya [Detection of faults in the traction power supply system]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no. 8, pp. 45–47.

14. Menaker K.V., Pul'tyakov A.V., Vostrikov M.V., Orlov A.V. Uovershenstvovanie skhemy bloka upravleniya elektrodvigatelya malogabaritnogo strochnogo universal'nogo [Improvement of the circuit of the control unit of the electric motor of a small-sized universal switch]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2023, vol. 9, no. 4, pp. 313–323.

15. Puzina E.Yu. Reguliruyemye tyagovye preobrazovateli v sisteme ehlektrosnabzheniya postoyannogo toka [Adjustable traction converters in a DC power supply system]. Ph.D.'s thesis. Saint Petersburg, 1998. 24 p.

16. Ovechkin I.S., Polyakov M.M. Izmenenie signala na vykhode lineinogo kolebatel'nogo kontura pri priblizhenii chastoty k rezonansnoi [Change in the signal at the output of a linear oscillating circuit as the frequency approaches the resonant one]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 2 (12), pp. 372–382.

17. Komissarov Yu.A., Gordeev L.S., Vent D.P., Babokin G.I. Osnovy elektrotehniki, mikroelektroniki i upravleniya. Teoriya i raschet (v 2 t) [Fundamentals of electrical engineering, microelectronics and control. Theory and calculation (In 2 vol.)]. Vol. 1. Moscow: Khimiya Publ., 2007. 451 p.

18. Krasnoshapka M.M., Kovalenko G.A., Krasnoshapka D.M. Plavno reguliruyemye transformatory i avtotransformatory s vrashchayushchimsya magnitnym polem [Continuously controlled transformers and autotransformers with a rotating magnetic field]. Kyiv: IED Publ., 1986. 49 p.

19. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow: Vysshya Shkola Publ., 1987. 248 p.

20. Strakhov S.V. Perekhodnye protsessy v elektricheskikh tsepyakh, sodержashchikh mashiny peremennogo toka [Transient processes in electrical circuits containing alternating current machines]. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1960. 247 p.

21. Mishin S.V., Mishina I.V. Matematicheskoe modelirovanie upravlyаемого transformatora s vrashchayushchimsya magnitnym polem [Mathematical modeling of a controlled transformer with a rotating magnetic field]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii* [Scientific bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation], 2008, no. 126, pp. 87–91.

22. Venikov V.A., Venigov G.V. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primeritel'no k zadacham elektroenergetiki) [Theory of similarity and modeling (in relation to the tasks of the electric power industry)]. Moscow: Vysshya Shkola Publ., 1984. 438 p.

23. Petrov G.N. Transformatory. T. 1. Osnovy teorii [Transformers. Vol. 1. General problems of theory]. Moscow–Leningrad: Energoizdat Publ., 1934. 446 p.

### Информация об авторах

**Иванов Николай Олегович**, кафедра электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: ivanov\_no@baikalenergy.com.

**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

**Nikolai O. Ivanov**, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: ivanov\_no@baikalenergy.com.

**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.

## Условия применения максимально возможной толщины тормозных колодок в тормозной системе тележки грузового вагона с цилиндрами 670В

В.В. Синецын<sup>1</sup>✉, Г.И. Петров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ТМХ Инжиниринг», обособленное предприятие в г. Брянск «КБ «Локомотивы», г. Брянск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

✉universalmasch@yandex.ru

### Резюме

Эксплуатация грузовых вагонов с отдельным торможением выявила нерешенность проблемы нормирования выхода штока тормозного цилиндра. Работы по определению расчетного выхода штока цилиндра с учетом особенностей современных конструкций показывают значительное превышение нижней и верхней границ выхода штока относительно нормативных, а существенно отличающиеся упругие деформации различных по структуре рычажных передач предопределяют невозможность применения одного нормативного диапазона выхода штока. Кроме того, использование авторегулятора для таких вагонов, главным образом хопперов, не позволяет эксплуатировать их при наличии в рычажных системах этих вагонов цилиндров 710 с конструктивным максимальным выходом штока 125 мм, рекомендованного нормативными документами. Один из возможных путей решения данной проблемы – применение рычажной системы с установленными на тележках тормозными цилиндрами и унифицированной рычажной передачей. Такие системы являются перспективными для использования на железных дорогах России, соответственно их исследование актуально. Для схемы с унифицированной рычажной передачей и размещением на тележке двухосной типа 2 и типа 3 (ГОСТ 9246-2013) цилиндров 670В в работе определялся фактический выход штока. В статье оценена возможность прохождения крутого затяжного спуска вагоном с разработанной схемой. Разработана таблица монтажных размеров тормозной системы в эксплуатации для тормозной колодки толщиной  $60 \pm 4$  мм. На основании таблицы и полученного выхода штока, учитывающего упругую деформацию тормозной системы, установлен фактический суммарный ход штока и винта тормозного цилиндра в эксплуатации. Определены условия применения максимально возможной толщины тормозных колодок.

### Ключевые слова

рычажная передача, тормозной цилиндр, упругая составляющая, деформация изгиба, тормозная колодка, выход штока и винта

### Для цитирования

Синецын В.В. Условия применения максимально возможной толщины тормозных колодок в тормозной системе тележки грузового вагона с цилиндрами 670В / В.В. Синецын, Г.И. Петров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 17–26. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).17-26.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 04.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 20.11.2023 г.; принята к публикации: 22.11.2023 г.

## Conditions for the use of the maximum possible thickness of brake pads in the braking system of a freight wagon trolley with 670V cylinders

V.V. Sinitsyn<sup>1</sup>✉, G.I. Petrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ТМХ Engineering, the separate enterprise in Bryansk «Locomotives Design Bureau», Bryansk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

✉universalmasch@yandex.ru

### Abstract

The operation of freight wagons with separate braking revealed the unresolved problem of rationing the output of the brake cylinder rod. The works to determine the design stroke of the cylinder rod, taking into account the features of modern designs, show a significant excess of the lower and upper limits of the rod stroke relative to the normative ones while significantly different elastic deformation of lever gears of different structures predetermine the impossibility of using one standard range of the stroke of the rod. In addition, the use of an auto regulator for such wagons, mainly hoppers, determines the impossibility of operating such wagons when using 710 cylinders with a constructive maximum rod stroke of 125 mm in their lever systems, the use of which is requested by regulatory documents. One of the possible ways to solve this problem is the use of a lever system with brake cylinders mounted on trolleys and a unified lever transmission. Such systems are promising for use on the railways of the Russian Federation making their research relevant. For such a scheme with a unified lever transmission and placement of 670V cylinders on a biaxial type 2 and type 3 State Standard 9246-2013 trolley, the actual stroke of the rod was determined in opera-

tion. The possibility of passing a steep long descent by a wagon with a developed scheme is evaluated. A table of mounting dimensions of the brake system in operation for a  $60 \pm 4$  mm thick brake pad has been developed. Based on the table and the resulting stroke of the rod, taking into account the elastic deformation of the brake system, the actual total stroke of the rod and the screw of the brake cylinder in operation is determined. The conditions for the use of the maximum possible thickness of brake pads in operation are determined.

### Keywords

lever gear, brake cylinder, elastic component, bending deformation, brake pad, stroke of the rod and screw

### For citation

Sinitsyn V.V., Petrov G.I. Usloviya primeneniya maksimal'no vozmozhnoi tolshchiny tormoznykh kolodok v tormoznoi sisteme telezhki gruzovogo vagona s tsilindrami 670V [Conditions for the use of the maximum possible thickness of brake pads in the braking system of a freight wagon trolley with 670V cylinders] *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 17–26. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).17-26.

### Article Info

Received: October 4, 2023; Revised: November 20, 2023; Accepted: November 22, 2023.

### Введение

На железных дорогах РФ в настоящее время эксплуатируется значительное количество грузовых вагонов с отдельным торможением. Как правило, рычажные передачи таких вагонов включают в себя цилиндр 710, который в соответствии с ГОСТ 31402-2013 [1], имеет максимальный конструктивный выход штока 125 мм. Проблемой таких схем является нормирование величины выхода штока. В работе [2] на примере рычажных передач вагонов-хопперов моделей 19-3018 и 19-3058 показаны расчетные, близкие к реальным, величины выхода штока, учитывающие упругие деформации рычажных передач. При этом расчетная верхняя и нижняя границы выхода штока значительно выше нормативных. Приведенные расчеты подтверждаются натурными замерами величин упругих составляющих выхода штока, проведенными на этих вагонах.

При этом было определено, что существенно различающиеся по структуре тормозные рычажные передачи этих вагонов определяют и различия в величинах упругих составляющих выходов штока. При этом невозможно получить один общий диапазон выхода штока для разных по структуре рычажных передач. Этот вывод требует пересмотра нормативных документов ОАО «РЖД» в части норматива выхода штока для снижения вероятности возникновения опасных состояний (увеличение тормозного пути или отбор энергии состава и возможность примерзания колодок и юза колесных пар).

Однако выводы в этих статьях не предполагают обязательной замены цилиндров 710 на эксплуатирующемся подвижном составе.

При этом требуется отметить, что, если устанавливать верхнюю расчетную границу полученного диапазона выхода штока для вагонов-хопперов моделей 19-3018 и 19-3058 (при зазорах между колодкой и колесом  $\delta_k = 8$  мм) применение цилиндров 710 недопустимо. Это связано с работой авторегулятора в эксплуатации, а именно, необходимостью сжатия отпускной пружины авторегулятора на 10–15 мм (в зависимости от установленного регулятора) для срабатывания его при износах колодок [3, 4]. Это вызовет дополнительный выход штока около 31–46 мм, что в сумме с расчетным его выходом составляет близкую к максимальному конструктивному выходу штока величину.

Одним из наиболее радикальных методов, решающих проблемы типовых отечественных рычажных передач грузовых вагонов, в том числе необходимости замены рычажной передачи тележки типа 18-100 [5–7], является переход к тормозной системе с расположенными на тележке цилиндрами [8–11]. Применение унифицированной рычажной передачи позволит решить проблему нормирования выхода штока. В связи с этим исследование возможности применения таких конструкций является актуальным.

В работе [11] был предложен вариант унифицированной схемы рычажной передачи для тележек двухосных типа 2 и типа 3 (ГОСТ 9246-2013 [12]) с расположением цилиндров 670В на тележке (рис. 1).

В работе получена таблица монтажных размеров рычажной системы с тормозными колодками толщиной  $60 \pm 4$  мм к схеме на рис. 2.



**Рис. 1.** Унифицированная рычажная передача грузовых четырехосных вагонов  
**Fig. 1.** Unified lever transmission of four-axle freight wagons

В таблице учитывались положения элементов рычажной передачи при полномерных колодках и полном износе колодок (минимальный размер изношенной колодки согласно [13, 14]), а также износе обода колеса по радиусу с интервалом по 10 мм (по диаметру 20 мм) от максимальной (теоретически) толщины обода до предельно изношенной.

Согласно таблице, максимальная суммарная величина выхода штока и винта на каж-

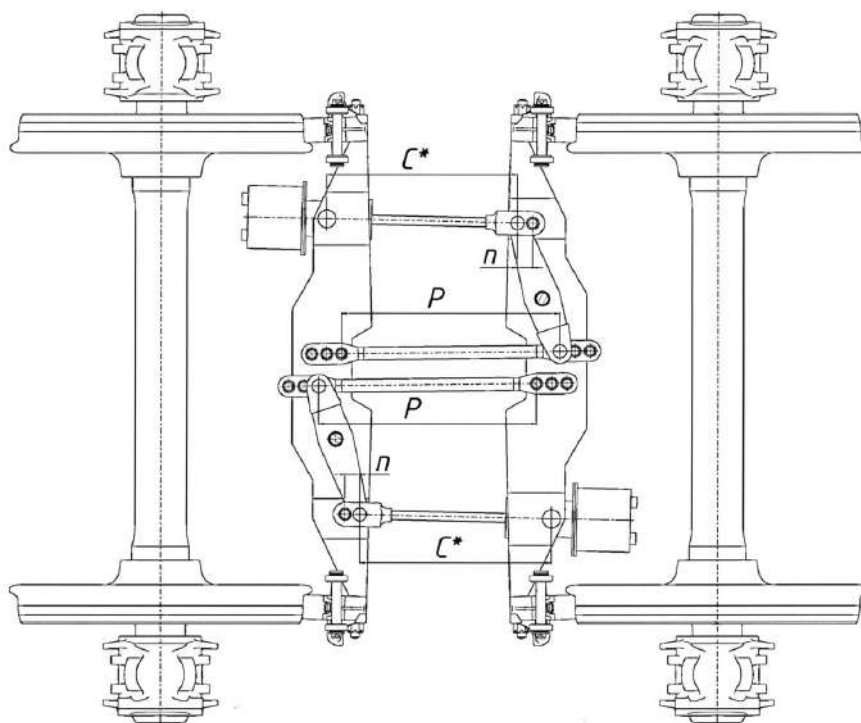
дой ступени переключений монтажных размеров (шесть ступеней) с учетом максимального зазора между колодкой и колесом:

$$\Delta t = C^*_{\max} - C^*_{\min} + l_{\text{шт}},$$

где  $l_{\text{шт}} = n\delta_k = 39$  мм – величина выхода штока в зависимости от принятого максимального передаточного отношения рычажной передачи и максимального нормативного зазора между колодкой и колесом;  $C^*$  – расчетное расстояние между осью крепления цилиндра и внутренним отверстием в головке его штока (см. рис. 2), в связи с этим  $C^*_{\min}$  – учитывает полномерные колодки толщиной 64 мм и диаметр колеса от максимально возможного до предельно изношенного с интервалом 10 мм по радиусу,  $C^*_{\max}$  – учитывает полностью изношенные на 54 мм колодки и диаметр колеса от максимально возможного до предельно изношенного с интервалом 10 мм по радиусу.

Для каждой из шести ступеней размер  $\Delta t$  несколько отличается и составляет от 348 мм на первой ступени до 340 мм на шестой. Причем допустимый ход штока и винта по техническим условиям на цилиндр 670В [15] составит 345 мм (выход винта относительно поршня 245 мм, рабочий ход поршня 100 мм).

Расчет максимальной величины выхода штока и винта цилиндра при этом требует



**Рис. 2.** Регулировочная схема рычажной передачи  
**Fig. 2.** Adjustment scheme of the lever gear

корректировки с учетом упругой деформации системы.

Таким образом, целью настоящей статьи является определение фактического выхода штока разработанной рычажной передачи с размещенными на тележке типа 2 и типа 3 (ГОСТ 9246-2013) и усовершенствование расчета монтажных размеров для эксплуатации вагонов с колодками с максимальной толщиной 64 мм.

### Определение диапазона выхода штока тормозного цилиндра и максимальной толщины тормозной колодки в эксплуатации с учетом упругой деформации рычажной системы

Определим фактический выход штока согласно методике [16] и возможную толщину колодок, учитывая размеры и параметры всех конструктивных элементов рычажной передачи. При унификации передаточного отношения и рычажной передачи для вагонов с осевой нагрузкой 23,5 и 25 тс расчетный выход штока также будет постоянным. Для этого сопоставим сочетание максимального усилия на штоке при наибольшем передаточном отношении рычажной передачи и минимального усилия на штоке при наименьшем передаточном отношении.

Исходные данные к расчетной схеме на рис. 3, где  $a, b$  – плечи рычага;  $F_{расп.}$ ,  $J_{расп.}$  – соответственно площадь и момент инерции сечения стержня распорки (стержень диаметром 42 мм);  $l_{расп.}$  – длина распорки по осям соединения с рычагами;  $e$  – эксцентриситет между линией, вдоль которой приложена нагрузка и осью стержня в средней части распорки;  $F_{вин.}$  – площадь сечения винта регулятора тормозного цилиндра;  $l_{вин.} = l_{нак.} + l_{вых.}$  – рабочая длина винта регулятора ( $l_{нак.}$  – длина наконечника;  $l_{вых.}$  – выход винта относительно поршня).  $E = 2,1 \cdot 10^2$  кН/мм<sup>2</sup>.

В шарнирном соединении цилиндра и тормозной балки, головке штока цилиндра и соединенным со штоком концом рычага запрессованы стальные втулки. Рассмотрен вариант установки втулок из композиционного прессовочного материала (КПМ) в шарнирных соединениях осей и тормозных балок. В головке рычага, соединенной с распоркой, в средней части рычага, а также в головках распорки запрессованы втулки КПМ.

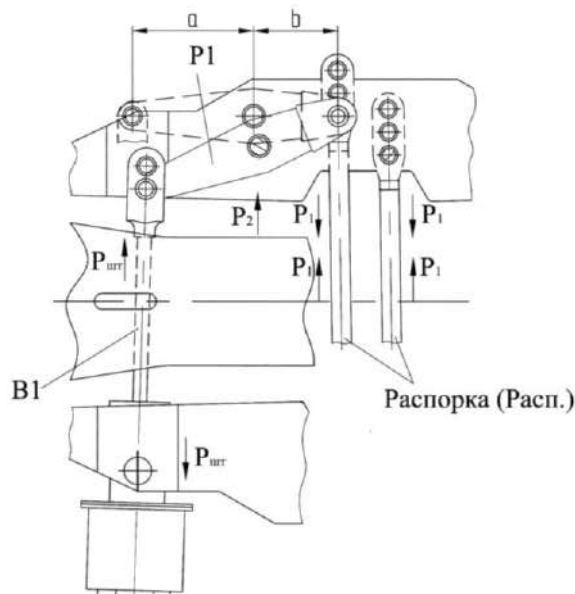


Рис. 3. Схема тормозной рычажной передачи (изменение положений тормозных балок при различных положениях рычага не показано)

Fig. 3. The scheme of the brake lever transmission (changing the positions of the brake beams at different lever positions is not shown)

Для схемы рычажной передачи на рис. 2 с максимальным передаточным отношением  $n_{тmax} = 4,88$  плечи рычага равны  $a = 266$  мм,  $b = 184$  мм; с минимальным передаточным отношением  $n_{тmin} = 4,82$  плечи рычага равны  $a = 263$  мм,  $b = 187$  мм;  $F_{расп.} = 1385$  мм<sup>2</sup>,  $J_{расп.} = 152668$  мм<sup>4</sup>,  $l_{расп.} = 725$  мм,  $e = 73$  мм,  $F_{вин.} = 707$  мм<sup>2</sup>,  $l_{вин.} = l_{нак.} + l_{вых.} = 330 + 425 = 575$  мм.

Максимальное усилие на штоке при полном служебном торможении груженого вагона:

$$P_{шт} = \left( \frac{\pi d_{ц}^2}{4} p_{ц} \eta_{ц} - F_1 \right) \eta_{п} = 9,1 \text{ кН} = 910 \text{ кгс}, \quad (1)$$

где  $d_{ц} = 203$  мм (20,3 см) – диаметр цилиндра;  $p_{ц} = 0,34$  МПа (3,4 кгс/см<sup>2</sup>) – максимальное значение давления в тормозном цилиндре для груженого вагона при полном служебном торможении;  $\eta_{ц} = 0,98$  – КПД цилиндра;  $F_1 = 1,2$  кН (120,05 кгс);  $\eta_{п} = 0,95$  – КПД рычажной передачи. Из соотношения плеч рычага определяются  $P_1 = 13,155$  кН;  $P_2 = 22,255$  кН.

Определим деформации в элементах рычажной передачи с учетом максимального выхода винта регулятора (с дополнительным наконечником). Поскольку шток имеет небольшую длину и значительную жесткость, в расчете его упругую деформацию не учитываем.

*Деформация винта регулятора В1.*

Учитывая наличие стальных втулок в головке штока, для винта определим только деформацию стержня с наконечником:

$$\Delta l_{\text{вин.}} = \frac{P_{\text{шт.}} l_{\text{вин.}}}{EF_{\text{вин.}}} = l_{\text{шт.у.1}} = 0,035 \text{ мм};$$

*Деформация рычага Р1 в средней части.*

Величина деформации в средней части рычага при изгибе:

$$\Delta_{\text{РР1}} = \frac{12a^3 R_a \bar{R}_a}{E\delta} \int_0^a \frac{z^2}{h^3 z^3 + h_1^3 a^3} dz + \frac{12b^3 R_b \bar{R}_b}{E\delta} \int_0^b \frac{z^2}{h^3 z^3 + h_2^3 b^3} dz = 0,1 \text{ мм}. \quad (2)$$

*Радиальная податливость втулок в рычаге (приведена к средней части).*

Определим перемещения в средней части рычага  $\Delta_{\text{рв.Р1}}$  в точке приложения силы  $P_2$ , вызванные податливостью втулок. К втулке КПМ 40,2×24 (рабочая длина  $l_b = 22,5$  мм) приложена сила  $P_2$ . К двум параллельно работающим втулкам рычага КПМ 30,2×12 приложена сила  $P_1$  (рабочая суммарная длина  $l_b = 21$  мм). Сила  $P_{\text{шт.}}$  приложена к стальной втулке, в связи с чем элемент формулы, связанный с указанной силой не учитываем.

Для втулок КПМ 40,2:

$$\lambda_b = 0,166 + \frac{0,13125P}{l_b}; \quad (3)$$

для втулок КПМ 30,2:

$$\lambda_g = 0,1656 + \frac{0,17588P}{l_g}; \quad (4)$$

$$\Delta_{\text{рв.Р1}} = \lambda_{\text{в(Р2)}} + \lambda_{\text{в(Р1)}} \frac{a}{a+b} = 0,458 \text{ мм}. \quad (5)$$

Суммарно:

$$\Delta_{\text{Р1}} = \Delta_{\text{РР1}} + \Delta_{\text{рв.Р1}} = 0,1 + 0,458 = 0,558 \text{ мм}.$$

Упругая составляющая на штоке

$$l_{\text{шт.у.2}} = \Delta_{\text{Р1}} \frac{a+b}{b} = 1,36 \text{ мм}.$$

*Деформация распорки.*

Общая деформация сжатия и изгиба распорки определяется по формуле, приведенной в [17]:

$$\Delta_{\text{I.расп.}} = \frac{P_1 l}{2EF_{\text{расп.}}} + \frac{P_1 e^3}{3EJ_{\text{расп.}}} + \frac{P_1 e^2 l}{2EJ_{\text{расп.}}} = 0,86 \text{ мм}. \quad (6)$$

Радиальная податливость двух втулок КПМ 30,2×24 в концевых частях распорки (в

приведенном варианте запрессовано по три втулки в каждую головку). Рабочая длина втулки  $l_b = 22,5$  мм.

Податливость двух втулок распорки в соответствии с формулой (4):

$$\Delta_{\text{рв.расп.}} = 2\lambda_g = 0,536 \text{ мм}.$$

Суммарно  $\Delta_{\text{расп.}} = 0,86 + 0,536 = 1,4$  мм.

Упругая составляющая на штоке от сжатия распорки и податливости втулок:

$$l_{\text{шт.у.3}} = \Delta_{\text{расп.}} \frac{a}{b} = 2,02 \text{ мм}.$$

Упругая составляющая штока без учета деформаций тормозных балок:

$$l_{\text{шт.у}} = \sum_{i=1}^n l_{\text{шт.у.}i} = 3,415 \text{ мм}.$$

### **Деформация изгиба тормозной балки в точках приложения усилий от тормозного цилиндра, рычага и распорки, радиальная податливость запрессованных в отверстия балки втулок**

Расчет деформаций изгиба (а также напряжений) производился по методу конечных элементов (МКЭ) с помощью расчетного модуля Autodesk Inventor Professional 2019. Результаты расчетов деформаций показаны на рис. 4.

Деформация изгиба в точке приложения усилия  $P_{\text{шт.}}$  –  $\Delta b_{\text{Ршт.}} = 0,26$  мм; деформация изгиба в точке приложения усилия  $P_1$  –  $\Delta b_{\text{Р1}} = 0,47$  мм; деформация изгиба в точке приложения усилия  $P_2$  –  $\Delta b_{\text{Р2}} = 0,44$  мм.

В точке приложения усилия  $P_{\text{шт.}}$  установлены втулки из стали, деформацию втулок не учитываем.

*Деформации втулок в точке приложения усилия  $P_1$  –  $\Delta b_{\text{в.Р1}}$ .*

Рабочая длина двух параллельно работающих втулок КПМ 30,2×12  $l_b = 21$  мм.

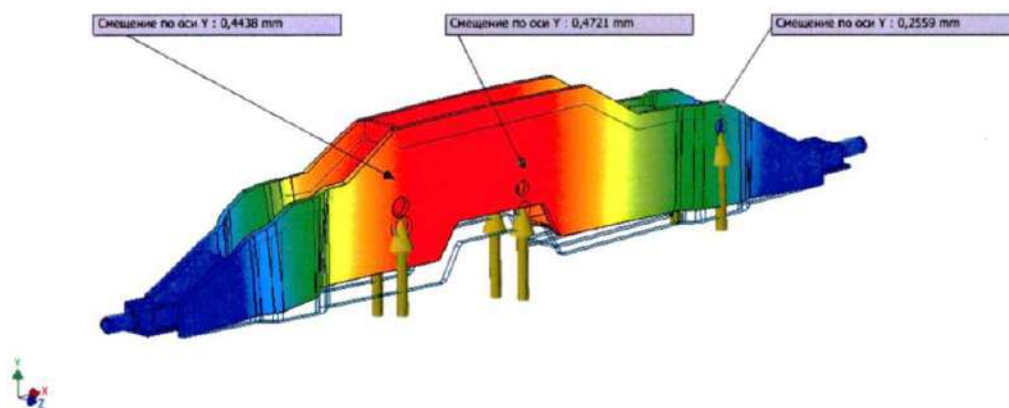
$$\Delta b_{\text{в.Р1}} = 0,276 \text{ мм}.$$

*Деформации втулок в точке приложения усилия  $P_2$  –  $\Delta b_{\text{в.Р2}}$ .*

Рабочая длина двух параллельно работающих втулок КПМ 40,2×12  $l_b = 21$  мм.

$$\Delta b_{\text{в.Р2}} = 0,305 \text{ мм}.$$

Упругая составляющая выхода штока от деформаций тормозных балок



**Рис. 4.** Схема распределения деформаций в тормозной балке при воздействии максимально возможных тормозных усилий в рычажной передаче

**Fig. 4.** Diagram of the distribution of deformation in the brake beam under the influence of the maximum possible braking forces in the lever gear

$$l_{шт.у.4} = \Delta b_{P_{шт}} + (\Delta b_{P_1} + \Delta b_{V_{P_1}}) \frac{a}{b} + (\Delta b_{P_2} + \Delta b_{V_{P_2}}) \frac{a+b}{b} = 3,16 \text{ мм.} \quad (7)$$

Суммарная упругая составляющая выхода штока рычажной передачи с учетом деформации тормозных балок:

$$l_{шт.у} = \sum_{i=1}^n l_{шт.у.i} = 6,6 \text{ мм.}$$

Пределы выхода штока при максимальных усилиях и деформациях:

$$l_{шт.мин} = l_{шт.у} + 5n_{тmax} = 6,6 + 5 \cdot 4,88 = 31 \text{ мм;}$$

$$l_{шт.маx} = l_{шт.у} + 8n_{тmax} = 6,6 + 8 \cdot 4,88 = 46 \text{ мм,}$$

где 5 и 8 – соответственно минимальный и максимальный нормативные зазоры между колодкой и колесом  $\delta_k$ . В данном случае рассмотрены пределы выхода штока при максимально возможных величинах усилий (в том числе наибольшем передаточном отношении) и деформаций в рычажной передаче.

Необходимо уточнить значения  $l_{шт}$  при наименьших усилиях и деформациях. Произведем расчет аналогично приведенному, при этом в исходных данных для расчета используем следующие характеристики:  $p = 0,3 \text{ МПа}$  ( $3,0 \text{ кгс/см}^2$ ) – минимальное значение давления в тормозном цилиндре для груженого вагона при полном служебном торможении;  $n_{тmin} = 4,82$ ,  $a = 263 \text{ мм}$ ,  $b = 187 \text{ мм}$ , при этом расположение шарнира на тормозной балке не изменится.

Получим согласно формуле (1)  $P_{шт} = 7,9 \text{ кН}$ , из соотношения плеч рычага  $P_1 = 11,1$ ,  $P_2 = 19 \text{ кН}$ .

Деформация винта регулятора В1:

$$\Delta l_{вин.} = l_{шт.у.1} = 0,031 \text{ мм.}$$

Деформация рычага P1 в средней части при изгибе рычага по формуле (2)  $\Delta_{P_{P1}} = 0,09 \text{ мм.}$

Радиальная податливость втулок по формулам (3) – (5)  $\Delta_{P_{P1}} = 0,428 \text{ мм.}$

Суммарно  $\Delta_{P1} = 0,518 \text{ мм.}$

Упругая составляющая на штоке  $l_{шт.у.2} = 1,25 \text{ мм.}$

*Деформация распорки.*

Общая деформация сжатия и изгиба распорки по формуле (6)  $\Delta_{I_{расп.}} = 0,73 \text{ мм.}$

Радиальная податливость двух втулок распорки в соответствии с формулой (4)  $\Delta_{P_{P_{расп.}}} = 0,5 \text{ мм.}$

Суммарно  $\Delta_{расп.} = 0,73 + 0,5 = 1,23 \text{ мм.}$

Упругая составляющая на штоке от сжатия распорки и податливости втулок  $l_{шт.у.3} = 1,73 \text{ мм.}$

Упругая составляющая на штоке без учета деформаций тормозных балок:

$$l_{шт.у} = \sum_{i=1}^n l_{шт.у.i} = 3 \text{ мм.}$$

*Деформации изгиба и податливость втулок тормозной балки в точках приложения наименьших усилий от тормозного цилиндра и рычага.*

Расчет деформаций изгиба произведем с помощью МКЭ:

– деформация изгиба в точке приложения усилия  $P_{шт} - \Delta b_{P_{шт}} = 0,22 \text{ мм;}$

– деформация изгиба в точке приложения

усилия  $P_{1\_}\Delta b_{P_1} = 0,4$  мм;

– деформация изгиба в точке приложения  
усилия  $P_{2\_}\Delta b_{P_2} = 0,38$  мм.

Деформация втулок в точке приложения  
усилия  $P_{1\_}\Delta b_{P_1} = 0,26$  мм.

4.3 Деформации втулок в точке приложения  
усилия  $P_{2\_}\Delta b_{P_2} = 0,284$  мм.

Упругая составляющая выхода штока от  
деформаций тормозных балок по формуле (7):

$$l_{шт.у.4} = 2,745 \text{ мм.}$$

Суммарная упругая составляющая выхода  
штока рычажной передачи с учетом дефор-  
мации тормозных балок:

$$l_{шт.у} = \sum l_{шт.у.n} = 5,75 \text{ мм.}$$

Пределы выхода штока при минималь-  
ных усилиях и деформациях:

$$l_{шт.min} = 5,75 + 5 \cdot 4,82 = 29,85 \approx 30 \text{ мм;}$$

$$l_{шт.max} = 5,75 + 8 \cdot 4,82 = 44,31 \approx 44 \text{ мм.}$$

В данном случае рассмотрены пределы  
выхода штока при минимально возможных ве-  
личинах усилий (в том числе наименьшем пере-  
даточном отношении) и деформаций в рычаж-  
ной передаче.

Таким образом, общий диапазон значе-  
ний выхода штока для систем с наименьшими и  
наибольшими деформациями, предполагающий  
зазоры между колодкой и колесом  $\delta_k$  не менее  
5 мм и не более 8 мм составит  $l_{шт.} = 31\text{--}44$  мм.

При  $n = 4,82$   $\delta_k = 5,25\text{--}8$  мм; при  $n = 4,88$   
 $-\delta_k = 5\text{--}7,7$  мм.

При максимальном «нормативном» зна-  
чении выхода штока ( $l_{шт.max} = 44$  мм) допускае-  
мая для рассмотренной системы толщина ко-  
лодки без учета величины износа колеса:

$$\Delta t = \frac{L - l_{шт.}}{n_{t \max}}; \Delta t = 62 \text{ мм,} \quad (8)$$

где суммарный выход штока и винта составляет  
 $L = 345$  мм (выход винта относительно поршня  
245 мм, рабочий ход поршня 100 мм).

Максимальная толщина полномерной ко-  
лодки соответственно составит 72 мм.

### Оценка возможности применения цилиндра 670В в разработанной тормозной системе при торможении вагона на крутом затяжном спуске

На основании известной формулы [17] (9)  
для рассмотренной схемы определим необходи-  
мый максимально допустимый выход штока в

эксплуатации  $L_{\max}$  (максимальный выход штока,  
полученный с учетом износа колодок на крутом  
затяжном спуске):

$$n \leq \frac{L_{\max} - l_{упр}}{\frac{V_k}{m_k F_{тр}} + \Delta_c}, \quad (9)$$

где  $l_{упр.}$  – выход штока от упругих деформаций  
рычажной передачи;  $V_k$  – объемный износ ком-  
позиционной тормозной колодки  $83 \text{ см}^3$ ;  $m_k$  –  
число тормозных колодок, действующих на  
одно колесо (для четырехосных вагонов – од-  
на);  $F_{тр}$  – площадь трения композиционной  
тормозной колодки  $290 \text{ см}^2$ ;  $\Delta_c$  – средний зазор  
между тормозной колодкой и колесом, равный  
 $0,5\text{--}0,8$  см,  $n = n_{\max}$ .

С учетом  $\Delta_c = 0,8$  см (8 мм) и  $l_{упр} = 0,66$  см  
(6,6 мм) определяем  $L_{\max} \geq 5,96$  см (59,6 мм).  
Максимальный выход штока, полученный с уче-  
том износа колодок на крутом затяжном спуске,  
для цилиндра не превышает рабочего хода штока  
(100 мм).

### Определение условий применения максимально возможной толщины тормозных колодок в эксплуатации

При значении  $l_{шт. \max} = 44$  мм можно уви-  
деть, что определенные в [11] суммарные вы-  
ходы штока и винта цилиндра  $\Delta t$  на всех шести  
ступенях переключения монтажных размеров  
будут превышать максимально допустимый  
размер  $L = 345$  мм [16], т.е. полученные разме-  
ры будут недостаточными для применения ко-  
лодок толщиной 64 мм до полного их износа  
при разбиении диапазона износа обода колеса  
на шесть ступеней.

Учитывая передаточное отношение тор-  
мозной системы  $n = 4,88$  рассмотрим возмож-  
ность применения семи ступеней разбиения и  
разработаем уточненную таблицу монтажных  
размеров для вагона с колодками толщиной  $60 \pm 4$   
мм. Обозначения размеров в таблице соот-  
ветствуют рис. 2.

Максимальная суммарная величина вы-  
хода винта и штока (см. табл.) на каждой сту-  
пени переключений монтажных размеров при  
 $l_{шт.} = 44$  мм.

По порядку (от первой до седьмой ступе-  
ни) от максимального (теоретически) диаметра  
колеса до предельно изношенного суммарный  
выход штока и винта составит: 344, 338, 339,  
339, 341, 338, 338 мм.



Монтажные размеры тормозной рычажной передачи двухосной тележки грузового вагона с тормозными колодками толщиной  $60 \pm 4$  мм  
 Mounting dimensions of the brake lever gear of a two-axle trolley of a freight wagon with brake pads  $60 \pm 4$  mm thick

Обозначение размера Size indication	Величина размера при среднем диаметре колес тележки $D_{cp} = (D_1 + D_2) / 2$ , мм The size with the average diameter of the trolley wheel						
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
	964–948	947–932	931–916	915–898	897–880	879–862	861–844
Регулировочный размер в головке штока, $n$ Adjustment size in the rod head	0	0	50	0	50	50	50
Длина распорки, $P$ Spacer length	725	775	775	825	825	875	875
Расчетное расстояние между осью крепления цилиндра и внутренним отверстием в головке его штока, $C^*$ The calculated distance between the cylinder mounting axis and the internal hole in the head of its rod	616–916	588–882	575–870	596–891	586–883	560–854	602–896

Таким образом, получим возможность применения колодки толщиной  $60 \pm 4$  мм до полного ее износа при разбиении величины износа обода колеса на семь интервалов.

Применение колодок толщиной  $65^{+5}$  мм [5, 18] практически невозможно (размер интервала должен быть уменьшен еще на 12 мм по диаметру, с 15–16 мм). Кроме того, в [18] максимальным является дробление на семь интервалов.

Для применения колодок максимальной толщины необходимо иметь дополнительно не менее 30 мм хода штока и винта, что потребует изменения конструкции рассмотренного цилиндра.

### Заключение

Определен выход штока тормозного цилиндра, учитывающий все упругие деформации рычажной передачи  $l_{шт.} = 31–44$  мм при зазорах между колодками и колесами  $\delta_k = 5,25–7,7$  мм (при нормативе  $\delta_k = 5–8$  мм).

Расчитан максимальный выход штока тормозного цилиндра 670В (при движении на

крутом затяжном спуске) в рассмотренной системе  $L_{max} = 59,6$  мм, учитывающий полученную по результатам расчетов упругую составляющую  $l_{упр.} = 6,6$  мм, максимальный зазор между колодкой и колесом  $\delta_k = 8$  мм, величину износа композиционных колодок на крутом затяжном спуске  $V_k = 83$  см<sup>3</sup>. Эта величина не превышает рабочего хода штока (100 мм), что подтверждает возможность применения разработанной рычажной передачи с цилиндром 670В в эксплуатации.

Для рассмотренной модели рычажной передачи установлена максимальная толщина композиционных тормозных колодок 64 мм. Применение колодок с максимально допустимой в эксплуатации толщиной  $65 + 5$  мм (70 мм) до их полного износа потребует пересмотра конструкции цилиндра 670В для увеличения суммарного выхода штока и винта на величину не менее 30 мм. Увеличение хода штока дополнительно на 28–30 мм позволит отказаться от регулировки стяжной муфтой размера  $C^*_{min}$ .

### Список литературы

1. ГОСТ 31402-2013. Цилиндры тормозные железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия (ред. от 29.10.2015). Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.

2. Синицын В.В. Регулирование выхода штока тормозного цилиндра вагона // Железнодорожный транспорт. 2018. № 8. С. 52–53.
3. ГОСТ 34434-2018. Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета. Введ. : 2019–08–01. М. : Стандартинформ, 2018. 31 с.
4. Типовой расчет тормоза грузовых и рефрижераторных вагонов. М. : ЦВ-ВНИИЖТ МПС РФ, 1996. 76 с.
5. Вагоны. Проектирование, устройство и методы испытаний / Л.Д. Кузьмич, А.В. Кузнецов, Б.А. Ржавинский и др. М. : Машиностроение, 1978. 376 с.
6. Карпычев В.А., Андреев П.А., Никитин Г.Б. К вопросу оценки и контроля тормозных нажатий колодок на колеса в зависимости от положений рычагов при регулировках рычажной передачи тележки 18-100 // Вестн. Науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2013. № 5. С. 43–48.
7. Тулузин С.В., Горский Д.В. Оценка работоспособности тормозной рычажной передачи тележки грузового вагона на различных стадиях износа колодок и колес // Вестн. Науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2015. № 2. С. 38–44.
8. Пат. 3499507 США. Тормозное устройство и регулировочные средства тележки железнодорожного вагона / Д.Г. Скотт, Ф. Тэмпл. Заявл. : 22.10.1968 ; опубл. 10.03.1970.
9. Freight catalog // Tradefin industries : site. URL: <https://tradefin.com.ar/wp-content/uploads/2017/05/WabtecFreightCatalog.pdf> (Дата обращения 26.09.2023).
10. Башкиров К.В., Болотов К.Н., Палатов Д.В. Тормозное оборудование для современного вагона // Вагоны и вагонное хозяйство. 2011. № 4. С. 26–28.
11. Синицын В.В., Кобищанов В.В. Тормозная система для потележечного торможения грузовых вагонов // Вестник БГТУ. 2020. № 3 (88). С. 21–28.
12. ГОСТ 9246-2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. Введ. 2014–07–01. М. : Стандартинформ, 2014. 37 с.
13. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утв. Советом по ж.-д. трансп. государств-участников Содружества : протокол от 6-7 мая 2014 г. № 60 (приложение № 18). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
14. ТУ 2571-028-00149386-2000. Колодки тормозные композиционные с сетчато-проволочным каркасом для железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия.
15. ТУ 3184-503-05744521-95. Цилиндры тормозные со встроенным регулятором 670. Технические условия.
16. Синицын В.В. Методика расчета выхода штока тормозного цилиндра грузовых четырехосных вагонов с учетом упругой составляющей // Тяжелое машиностроение. 2015. № 6. С. 19–23.
17. Расчет и проектирование пневматической и механической частей тормозов вагонов / П.С. Анисимов, В.А. Юдин, А.Н. Шамаков и др. М. : Маршрут, 2005. 248 с.
18. Общее руководство по ремонту тормозного оборудования вагонов 732-ЦВ-ЦЛ : утв. на 54-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества (п. п. 29.3 п. 1 протокола от 18-19.05.2011 г.). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.

### References

1. GOST 31402-2013. Tsilindry tormoznye zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya (red. ot 29.10.2015) [State Standard 31402-2013. Brake cylinders for railway rolling stock. General specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 12 p.
2. Sinitsyn V.V. Regulirovanie vykhoda shtoka tormoznogo tsilindra vagona [Regulation of the output of the brake cylinder rod of the wagon]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2018, no. 8, pp. 52–53.
3. GOST 34434-2018. Tormoznye sistemy gruzovykh zheleznodorozhnykh vagonov. Tekhnicheskie trebovaniya i pravila rascheta [State Standard 34434-2018. Brake systems of freight cars. Technical requirements and calculation rules]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. 31 p.
4. Tipovoi raschet tormoza gruzovykh i refrizheratornykh vagonov [Typical calculation of the brakes of freight and refrigerated wagons]. Moscow: TsV-VNIIZhT MPS RF Publ., 1996. 76 p.
5. Kuz'mich L.D., Kuznetsov A.V., Rzhavinskii B.A., Spivakovskii A.L., Kirillov V.I., Peirik Kh.I., Myslivets B.M. [Wagons. Design, device and test methods]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 376 p.
6. Karpychev V.A., Andreev P.A., Nikitin G.B. K voprosu otsenki i kontrolya tormoznykh nazhatii kolodok na kolea v zavisimosti ot polozhenii ryuchagov pri regulirovках ryuchazhnoi peredachi telezhki 18-100 [On the issue of evaluation and control of brake pad presses on wheels depending on the positions of levers when adjusting the lever transmission of the trolley 18-100]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport], 2013, no. 5, pp. 43–48.
7. Tuluzin S.V., Gorskii D.V. Otsenka rabotosposobnosti tormoznoi ryuchazhnoi peredachi telezhki gruzovogo vagona na razlichnykh stadiyakh iznosa kolodok i kolea [Evaluation of the performance of the brake lever transmission of a freight wagon trolley at various stages of wear of pads and wheels]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport], 2015, no. 2, pp. 38–44.
8. Daniel G. Scott, Fred Temple. Patent US 3499507 A, 10.03.1970.
9. Freight catalog. Available at: <https://tradefin.com.ar/wp-content/uploads/2017/05/WabtecFreightCatalog.pdf> (Accessed September 26, 2023).
10. Bashkirov K.V., Bolotov K.N., Palatov D.V. Tormoznoe oborudovanie dlya sovremennogo vagona [Braking equipment for a modern wagon]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2011, no. 4, pp. 26–28.

11. Sinitsyn V.V., Kobishchanov V.V. Tormoznaya sistema dlya potelezhechnogo tormozheniya gruzovykh vagonov [Braking system for the sweating braking of freight wagons]. *Vestnik BGTU* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2020, no. 3 (88), pp. 21–28.

12. GOST 9246-2013. Telezhki dvukhosnye trekhelementnye gruzovykh vagonov zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard 9246-2013. Bogies two-axle three-piece for freight wagons of 1520 mm gauge railways. General technical specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 37 p.

13. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva, protokol ot 6-7 maya 2014 g № 60 (prilozhenie № 18) [Rules for the maintenance of brake equipment and brake control of railway rolling stock : approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol no 60, dated May 6–7, 2014 (Annex no 18)].

14. TU 2571-028-00149386-2000. Kolodki tormoznye kompozitsionnye s setchato-provolochnym karkasom dlya zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov [Technical conditions 2571-028-00149386-2000. Composite brake pads with mesh-wire frame for railway freight wagons. Technical conditions].

15. TU 3184-503-05744521-95. Tsilindry tormoznye so vstroennym regulyatorom 670. Tekhnicheskie usloviya [Technical conditions 3184-503-05744521-95. Brake cylinders with built-in regulator 670. Technical conditions].

16. Sinitsyn V.V. Metodika rascheta vykhoda shtoka tormoznogo tsilindra gruzovykh chetyrekhosnykh vagonov s uchedom uprugoi sostavlyayushchei [Method of calculating the output of the brake cylinder rod of freight four-axle wagons taking into account the elastic component]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering], 2015, no. 6, pp. 19–23.

17. Anisimov P.S., Yudin V.A., Shamakov A.N., Korzhin S.N. Raschet i proektirovanie pnevmaticheskoi i mekhanicheskoi chastei tormozov vagonov [Calculation and design of pneumatic and mechanical parts of wagon brakes]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 248 p.

18. Obshchee rukovodstvo po remontu tormoznogo oborudovaniya vagonov 732-TsV-TsL: utv. na 54-m zasedanii Soveta po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv – uchastnikov Sodruzhestva (p.p. 29.3 p. 1 protokola ot 18-19.05.2011 g.) [General manual for the repair of braking equipment of wagons 732-TsV-TsL : approved at the 54th meeting of the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States (item 29.3 item 1 of the Protocol dated May 18–19, 2011)].

#### Информация об авторах

**Синицын Владимир Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор ООО «ТМХ Инжиниринг», обособленное предприятие в г. Брянск «КБ «Локомотивы», г. Брянск; e-mail: universalmasch@yandex.ru.

**Петров Геннадий Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вагонов и вагонного хозяйства, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва; petrov-gi@gmail.com.

#### Information about the authors

**Vladimir V. Sinitsyn**, Ph.D. in Engineering Science, Leading Design Engineer of TMH Engineering LLC, Separate Enterprise in Bryansk «Locomotives Design Bureau», Bryansk; e-mail: universalmasch@yandex.ru.

**Gennadii I. Petrov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Russian University of Transport (MIIT), Moscow; e-mail: petrovgi@gmail.com.

## Построение модели организации потоков пассажиров на вокзальном комплексе

И.А. Чубарова✉, А.Д. Доможирова

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

✉ia7chubarova@gmail.com

### Резюме

В организации работы вокзальных комплексов моделирование становится важной частью производственного процесса. Оно помогает детально продумать и оптимизировать практически все: от проектов зданий вокзала до загруженности инфраструктуры железнодорожного транспорта и использования ресурсов. При организации потоков пассажиров в здании вокзала и на привокзальной площади необходима оценка проходимости отдельных зон, числа посетителей, попадающих в какую-либо зону, а также плотности их потока. Актуальным является исследование загрузки элементов вокзального комплекса и выявление узких мест в перемещении людей в здании вокзала. В статье рассмотрены вопросы целесообразности применения имитационного моделирования в деятельности вокзальной инфраструктуры. Представлены результаты моделирования пассажиропотоков в системе AnyLogic. Процесс создания модели состоит из ряда этапов. На начальном этапе устанавливается главный критерий организации пассажиропотока – равномерное распределение и накопление пассажиров. Затем происходит выбор критериев системы, чтобы задать параметры модели: количество посетителей, интенсивность их прибытия. Впоследствии создается блок-схема, соответствующая структуре вокзального комплекса. Разработанная имитационная модель организации пассажиропотоков показала необходимость их деления на дальних и пригородных с целью равномерного накопления ожидающих отправления пассажиров. Учитывая, что пешеходные потоки нужно организовывать соответственно их источникам и направлениям движения, моделирование пассажиропотоков с AnyLogic позволяет определить характер транспортной доступности, что является важнейшим критерием при оценке качества предоставления услуг посетителям вокзального комплекса.

### Ключевые слова

вокзальный комплекс, пешеходный поток, система AnyLogic, построение моделей, моделирование, организация пассажиропотока, посетители, пассажиры, транспортная доступность

### Для цитирования

Чубарова И.А. Построение модели организации потоков пассажиров на вокзальном комплексе / И.А. Чубарова, А.Д. Доможирова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 27–38. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).27-38.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 03.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 13.11.2023 г.; принята к публикации: 14.11.2023 г.

## Building of a Model for Organizing Passenger Flows at the Station Complex

I.A. Chubarova✉, A.D. Domozhirova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ia7chubarova@gmail.com

### Abstract

In organizing the work of station complexes, modeling becomes an important part of the production process. It helps to think through in detail and optimize almost everything: from station building designs to the workload of railway transport infrastructure and resource usage. When organizing passenger flows in the station building and on the station square, it is necessary to assess the trafficability of individual zones, the number of visitors entering any of the zones, as well as the density of visitor flow. It is relevant to study the loading of elements of the station complex and identify bottlenecks in the movement of station visitors. The article discusses the feasibility of using simulation modeling in the activities of station infrastructure. The results of modeling passenger flows in the AnyLogic system are presented. The process of creating a model consists of a number of stages. At the initial stage, the main criterion for organizing passenger flow is established - the uniform distribution and accumulation of passengers. Then the system criteria are selected to set the model parameters: the number of visitors, the intensity of their arrival. Subsequently, a block diagram is created corresponding to the structure of the station complex. The developed simulation model for organizing passenger flows showed the need to divide passenger flows into long-distance and suburban ones in order to evenly accumulate passengers awaiting departure. Considering that pedestrian flows need to be organized according to their sources and directions of movement, modeling passenger flows with AnyLogic makes it possible to determine the nature of transport accessibility, which is the most important criterion when assessing the quality of services provided to visitors at the station complex.

**Keywords**

station complex, pedestrian flow, AnyLogic system, model building, simulation, organization of passenger flow, visitors, passengers, transport accessibility

**For citation**

Chubarova I.A., Domozhirova A.D. Postroenie modeli organizatsii potokov passazhirov na vokzal'nom komplekse [Building of a Model for Organizing Passenger Flows at the Station Complex]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 27–38. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).27-38.

**Article info**

Received: October 3, 2023; Revised: November 13, 2023; Accepted: November 14, 2023.

**Введение**

Технологический процесс работы вокзального комплекса включает в себя организацию перемещения пассажиров. На внеклассных вокзалах и вокзалах первого класса из-за большого количества посетителей требуется делить поток пассажиров путем точного расположения справочных устройств, билетных касс и отдельных проходов для дальних и пригородных пассажиров [1–3].

Необходимость разделения пассажиропотоков на вокзальном комплексе должна быть тщательно обоснована. Большое значение в этом вопросе имеет применение цифровых технологий, в том числе моделирование производственных процессов [4–6]. AnyLogic – программная среда, с помощью которой можно создавать модели распределения потоков посетителей на объектах инфраструктуры, например на железнодорожных вокзалах [7, 8]. В

данной статье рассматривается возможность применения системы AnyLogic для создания модели организации пассажиропотока на вокзальном комплексе.

**Создание имитационной модели организации пассажиропотока на вокзальном комплексе**

В рамках проведенного исследования в системе AnyLogic была разработана имитационная модель организации пассажиропотока вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский, имеющего три основных подъезда.

В модели агентами являются посетители вокзального комплекса в течении суток [9, 10]. Количество элементов в созданной модели – 22.

Настройки модели организации пассажиропотока вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский представлены в табл. 1–4.

**Таблица 1.** Сведения блока «Source-1»  
**Table 1.** Information for the «Source-1» block

Расписание интенсивности прибытия пассажиров Passenger Arrival Rate Schedule			
Время (московское), ч. Time (Moscow), hour	Интенсивность прибытия пассажиров, пасс./ч. Passenger arrival intensity, pass / hour	Время (московское), ч. Time (Moscow), hour	Интенсивность прибытия пассажиров, пасс./ч. Passenger arrival intensity, pass / hour
00:00–01:00	165	12:00–13:00	114
01:00–02:00	276	13:00–14:00	87
02:00–03:00	356	14:00–15:00	63
03:00–04:00	218	15:00–16:00	133
04:00–05:00	73	16:00–17:00	154
05:00–06:00	58	17:00–18:00	173
06:00–07:00	151	18:00–19:00	61
07:00–08:00	15	19:00–20:00	69
08:00–09:00	75	20:00–21:00	21
09:00–10:00	219	21:00–22:00	41
10:00–11:00	223	22:00–23:00	82
11:00–12:00	42	23:00–00:00	38

**Таблица 2.** Значения условий для блоков «SelectOutput»  
**Table 2.** Condition values for «SelectOutput» blocks

Название блока Block name	Выбор выхода Exit selection	Значение условия Condition value
Выбор1	При выполнении условия	((Покупка билета в БПА.size>2)  ((queue.size<1))
Выбор2	Заданной вероятностью	0,97 (посетитель отправляется)
Выбор3		0,98 (пассажир не обратиться к ЛВОКп)
Выбор4		0,97
Выбор5	При выполнении условия	Ожидание отправления.size<60

**Таблица 3.** Данные для блоков «Delay»  
**Table 3.** Data for «Delay» blocks

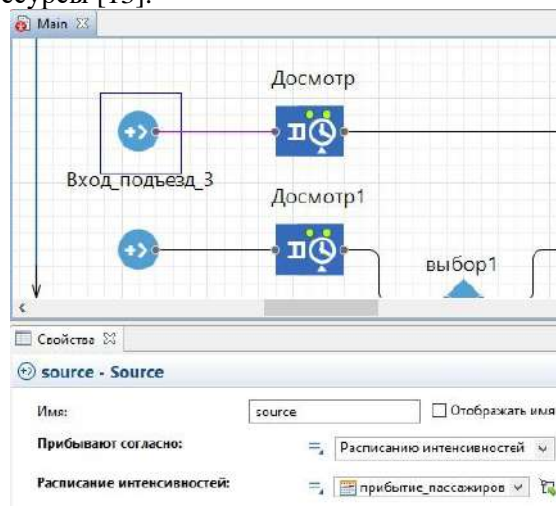
Название блока Block name	Минимальное время, мин. Minimum time, min	Вероятное время, мин. Probable time, min	Максимальное время, мин. Maximum time, min	Вместимость, чел. Capacity, people
Обращение к начальнику вокзала	1	1,5	2	1
Покупка билета в кассе	2	2,5	3	4
Покупка билета в билетопечатающем автомате	1,5	2	2,5	4
Посещение туалета	1,5	2	2,5	5

В табл. 1 приведено расписание интенсивности прибытия пассажиров на вокзальный комплекс для покупки билетов в кассах дальнего и пригородного сообщений, а также пассажиров, которые приходят с уже купленными билетами (пассажиры дальних поездов, пассажиры, купившие билеты заранее и купившие билеты онлайн). Число провожающих в среднем составляет 8 % от общего числа отправляющихся пассажиров, что тоже учтено.

Моделирование организации пассажиропотоков вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский начинается с помещения двух блоков «Source» на рабочую область программы AnyLogic и задания основных свойств данных блоков (рис. 1). Этим блокам присваивается одно общее имя «Вход\_подъезд\_3». Для задания интенсивности прибытия пассажиров учитываются два элемента расписания с указанием интенсивности прибытия пассажиров по часам (см. табл. 1). Добавление двух блоков обусловлено тем, что часть прибывающих посетителей сразу после досмотра идет приобретать билет в пригородную кассу или к билетопечатающему автомату (БПА), а другая часть приходит уже с приобретенными билетами [11, 12].

Для моделирования прохождения досмотра добавляется два блока «Service» с име-

нами «Досмотр» и «Досмотр1». Данные блоки захватывают для агента заданное количество ресурсов (рамок металлоискателя), задерживают их, а затем освобождают захваченные им ресурсы [13].



**Рис. 1.** Блок «Source»  
**Fig. 1.** Blocks "Source"

Далее для обоих путей добавляются блоки «SelectOutput» (рис. 2). В первом случае данному блоку присвоено имя «Выбор3» и он показывает, что часть посетителей обращается к дежурному помощнику начальника вокзала (ЛВОКп). Затем к блоку «Выбор3» присоеди-

няется блок «Выбор4», который учитывает пассажиров, посещающих туалет. Далее присоединяется блок «Выбор5», который обозначает, что в случае занятия всех сидячих мест в подъезде (60 мест), посетитель ждет отправления стоя. В случае проследования посетителя на кассу добавляется блок «Выбор1», который указывает на выбор места покупки билета (касса или БПА). Также в модели существует еще один блок «SelectOutput». Данный блок имеет имя «Выбор2», он означает что, после покупки билета посетитель либо ожидает отправления

поезда, и блок соединяется с блоком «Выбор3», либо билет куплен на другую дату, и пассажир покидает вокзал [14, 15].

Теперь необходимо обозначить процессы обращения к ЛВОКп, посещение туалета и ожидание отправления. Для этого добавляются блоки «Delay» (рис. 3).

Завершают модель два блока «Sink», которые показывают уход посетителей из подъезда № 3. Этим блокам присвоены имена «Выход к поездам» и «Выход в город» (рис. 4).

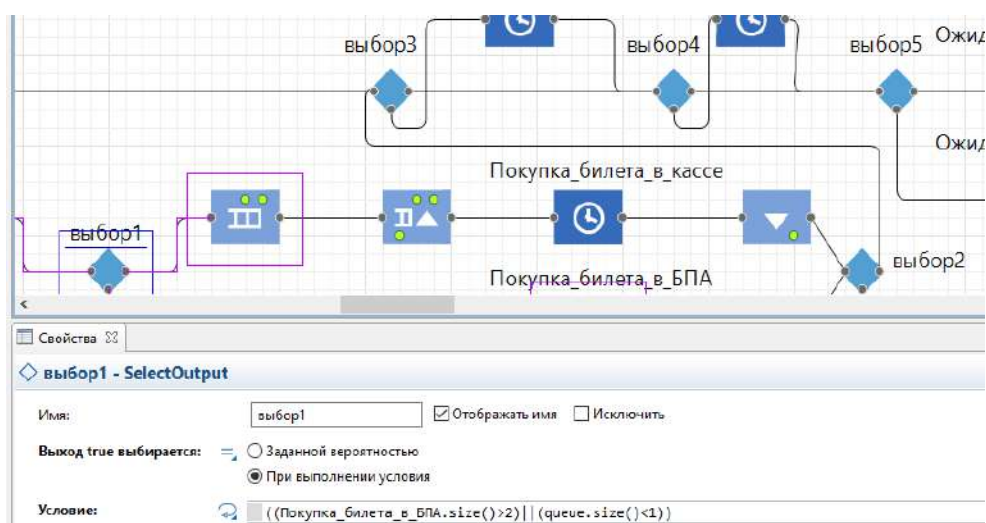


Рис. 2. Блок «SelectOutput»  
Fig. 2. Blocks «SelectOutput»

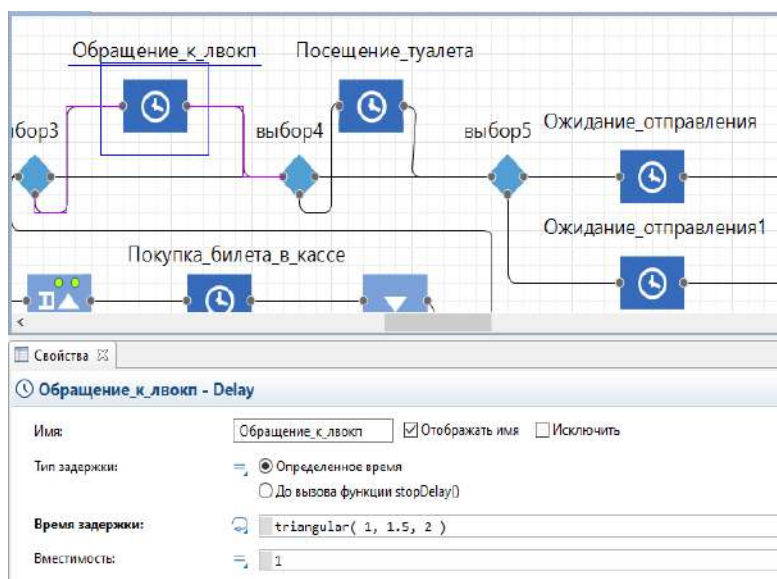


Рис. 3. Блок «Delay»  
Fig. 3. Blocks «Delay»

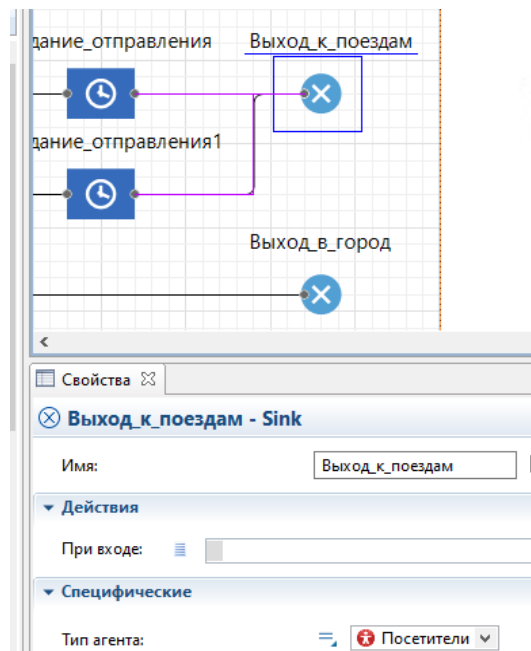


Рис. 4. Блок «Sink»

Fig. 4. Blocks «Sink»

С учетом заданных значений и блоков в существующих условиях, модель организации пассажиропотоков вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский» представлена на рис. 5.

После построения самой модели, для визуализации процессов, происходящих в подъезде вокзального комплекса, в среде AnyLogic имеется возможность создания анимации передвижения пассажиров при помощи прямоугольных узлов [14]:

- вход (для обозначения места создания посетителей);
- зона досмотра;
- зона ожидания сидя;
- зона ожидания стоя;

- зона обслуживания в БПА;
- зона обслуживания в кассах;
- зона очереди в кассы;
- туалет;
- зона обращения к ЛВОКп;
- зона, где находятся кассиры;
- зона, где находится ЛВОКп.

План с анимацией представлен на рис. 6.

Создание модели объемного вида проводится в формате 3D (рис. 7, 8).

В рамках исследования построено несколько статистических диаграмм. Первая диаграмма показывает, сколько посетителей (в процентах) совершали различные функции в пределах третьего подъезда (рис. 9).

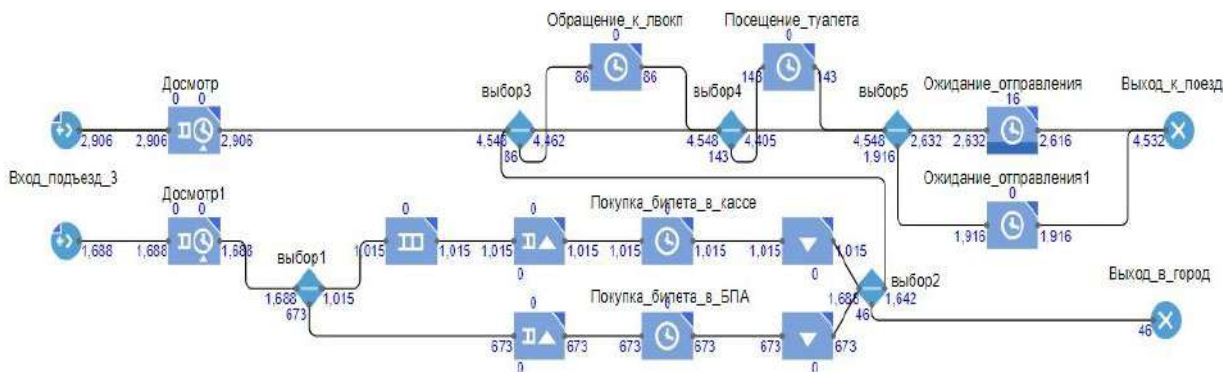
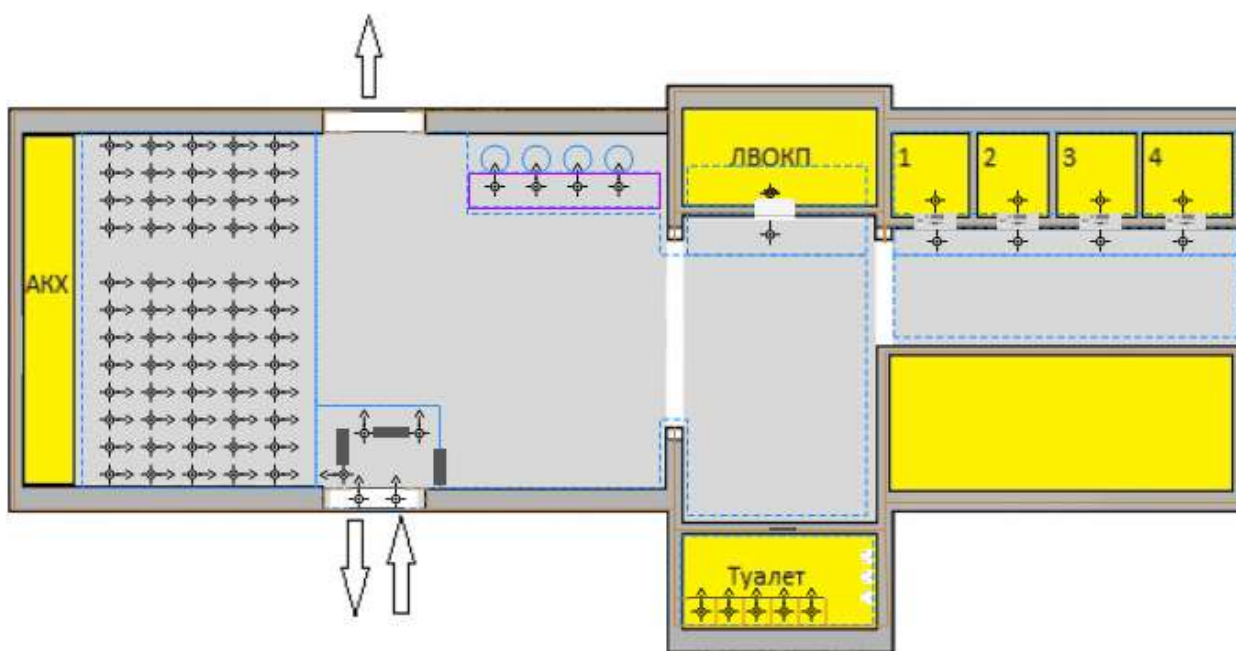


Рис. 5. Имитационная модель «Организация пассажиропотоков инфраструктуры вокзала Иркутск-Пассажирский»

Fig. 5. Simulation model «Arrangement of passenger flows of the station infrastructure Irkutsk-Passenger»

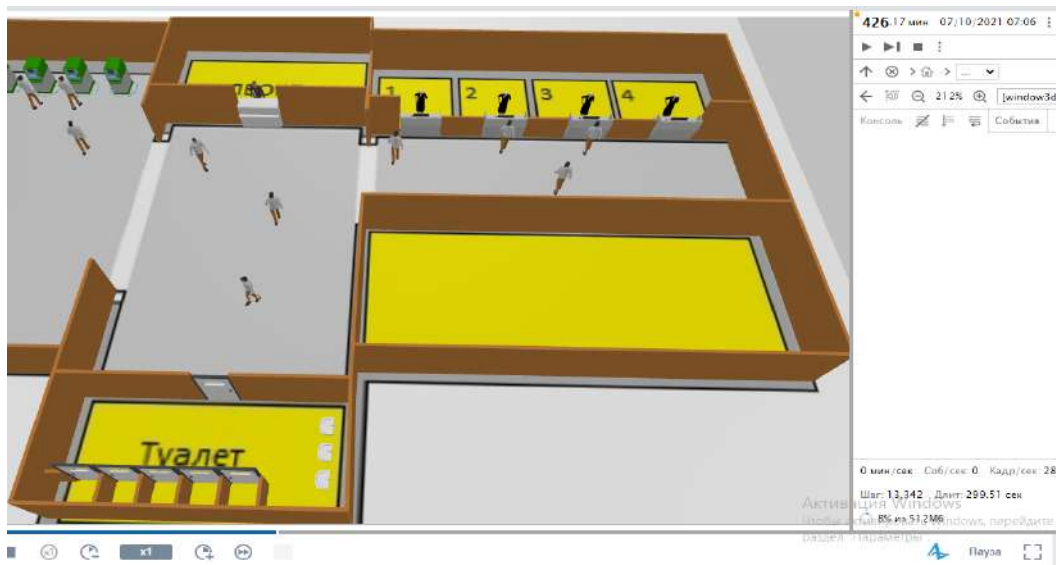




**Рис. 6.** Анимация модели организации пассажиропотоков подъезда № 3 инфраструктуры вокзала Иркутск-Пассажирский  
**Fig. 6.** Animation of the model of organization of passenger traffic at entrance No 3 of the station infrastructure Irkutsk-Passenger



**Рис. 7.** Вход и зал ожидания подъезда № 3 инфраструктуры вокзала Иркутск-Пассажирский  
**Fig. 7.** Entrance and waiting room entrance No 3 of the station infrastructure Irkutsk-Passenger



**Рис. 8.** Часть модели подъезда №3 инфраструктуры вокзала Иркутск-Пассажирский  
**Fig. 8.** Part of the model of entrance No 3 of the station infrastructure Irkutsk-Passenger



**Рис. 9.** Диаграмма процентного соотношения действий посетителей  
**Fig. 9.** Visitor Action Percentage Chart

Большее число посетителей (61,25 %) приходят в подъезд №3 с купленным заранее билетом и ожидают отправления поезда, не совершая при этом никаких других дополнительных действий. Меньшая часть посетителей (1,88 %) параллельно с ожиданием обращаются по своим вопросам к ЛВОКп. При этом 36,87 % посетителей при посещении подъезда №3 покупают билеты, из них 22,17 % – в кассах, а 14,7 % – в БПА.

Также в рамках исследования было проанализировано количество человек, ожидающих отправления поезда стоя. График с распре-

делением во времени числа пассажиров, ожидающих стоя, представлен на рис. 10.

Число стоящих людей достигает максимальных значений в периоды интенсивного движения поездов, когда отправляется по несколько дальних поездов и поездов пригородного сообщения, что вызывает неудобства для пассажиров.

Очевидна необходимость разделения дальних и пригородных пассажиропотоков при нахождении их в зале ожидания для совершенствования обслуживания и повышения комфорта пассажиров.



**Рис. 10.** Временной график количества людей, ожидающих отправления стоя  
**Fig. 10.** Timeline of the number of people waiting for departures standing

В ходе исследования построена модель разделения пассажиропотока по подъездам вокзального комплекса: из подъезда № 1 отправляются пассажиры дальнего следования, а из подъезда № 3 пассажиры пригородного сообщения. Данная модель состоит из 43 блоков.

Для разработки модели данные табл. 1

были скорректированы и приведены в табл. 4.

Имитационная модель для новых условий представлена на рис. 11.

Для этой модели проведен анализ действий посетителей в подъездах № 1 и 3, который представлен в виде диаграмм (рис. 12, 13).

**Таблица 4.** Сведения блока «Source»  
**Table 4.** Information for the «Source» block

Расписание интенсивности прибытия пассажиров Passenger Arrival Rate Schedule		
Время (московское), ч. Time (Moscow), hour	Интенсивность прибытия пассажиров, пасс. / ч. Passenger arrival intensity, pass / hour	
	Блок «Вход подъезд 1» Block «Entrance entrance 1»	Блок «Вход подъезд 3» Block «Entrance entrance 3»
00:00–01:00	115	45
01:00–02:00	65	125
02:00–03:00	135	67
03:00–04:00	105	36
04:00–05:00	5	89
05:00–06:00	23	3
06:00–07:00	83	61
07:00–08:00	2	10
08:00–09:00	12	11
09:00–10:00	101	93
10:00–11:00	110	2
11:00–12:00	12	12
12:00–13:00	0	80
13:00–14:00	5	29
14:00–15:00	21	31
15:00–16:00	92	89
16:00–17:00	35	0
17:00–18:00	141	0
18:00–19:00	15	0
19:00–20:00	0	0
20:00–21:00	0	0
21:00–22:00	12	0
22:00–23:00	87	0
23:00–00:00	23	10

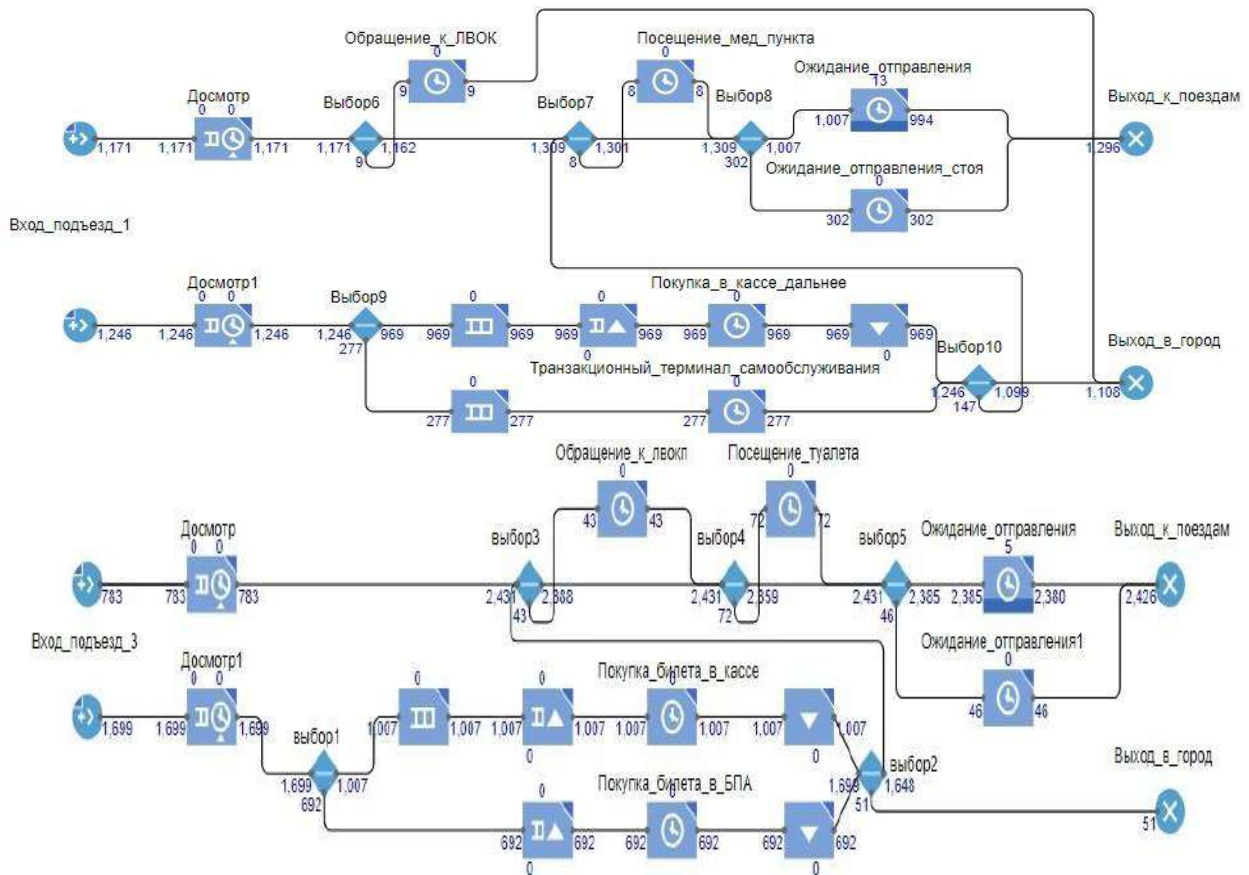


Рис. 11. Имитационная модель «Организация пассажиропотоков станции Иркутск-Пассажирский с разделением пассажиропотоков дальнего и пригородного следования по разным подъездам»

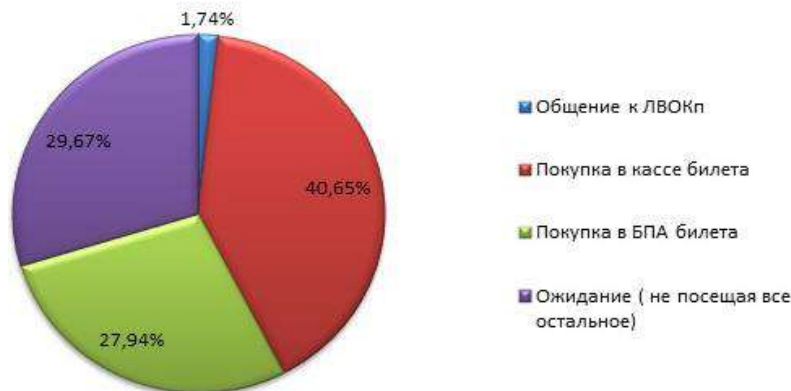
Fig. 11. Simulation model «Arrangement of passenger traffic at the station Irkutsk-Passenger with the separation of long-distance and suburban passenger traffic at different entrances»



Рис. 12. Диаграмма процентного соотношения действий посетителей первого подъезда

Fig. 12. Diagram of the percentage the first entrance visitors' actions

## Подъезд №3



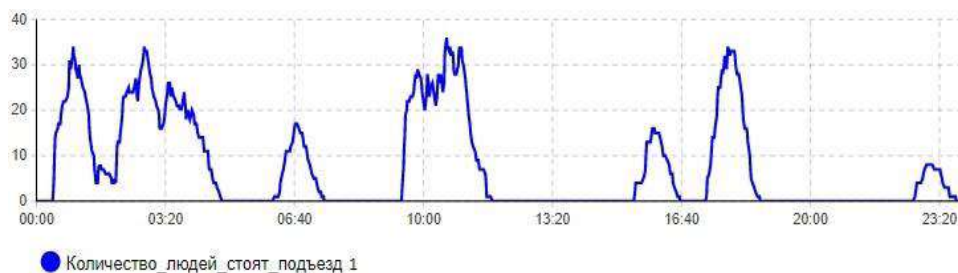
**Рис. 13.** Диаграмма процентного соотношения действий посетителей третьего подъезда  
**Fig. 13.** Diagram of the percentage of the third entrance visitors' actions

На данных диаграммах видно, что в первом подъезде преимущественная часть посетителей (51,83 %) приходят в подъезд № 1 для покупки билета, из них 40,31 % – покупают в кассах, а 11,52 % – в транзакционных терминалах самообслуживания (ТТС). Ближким к данному значению (47,46 %) является число посетителей, которые приходят в подъезд № 1 с купленным заранее билетом и ожидают отправления поезда, не совершая при этом никаких других дополнительных действий. Наименьшую часть составляют посетители, которые обращаются к ЛВОКп

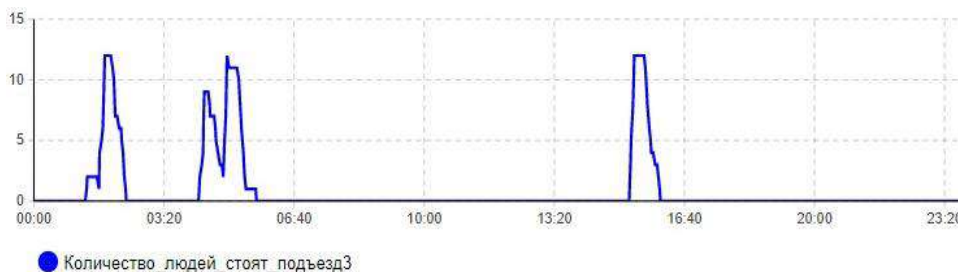
и в медицинский пункт.

Если рассматривать подъезд № 3, то можно увидеть, что по сравнению с диаграммой первой модели (см. рис. 8) снизилась доля ожидающих посетителей (с 61,25 до 29,67 %). На данной модели наибольшая часть посетителей перед отправлением покупает билеты (68,59 %): в кассах – 40,65 %, в БПА – 27,94 %. Наименьшую часть также занимает обращение к ЛВОКп.

Анализ количества человек, ожидающих отправления стоя при разделении пассажиропо-



*a*



*б*

**Рис. 14.** Временной график количества людей, ожидающих отправления стоя в подъезде № 1 (*a*) и в подъезде № 3 (*б*)

**Fig. 14.** Time schedule of the number of people waiting for departure standing at entrance No 1 (*a*) and at entrance No 3 (*b*)

тока показал, что число стоящих людей достигает своих максимальных значений в периоды интенсивного отправления поездов (рис. 14). Можно заметить, что общее число людей, ожидающих отправления стоя, в течение суток снизилось в данной модели по сравнению с предыдущей моделью на 81,84 %.

### Заключение

В научной статье рассмотрена перспектива применения имитационного моделирования при организации потоков пассажиров на вокзальном комплексе. В рамках исследования выполнен анализ интенсивности прибытия пассажиров на вокзал в течение суток, посещение ими различных зон, в том числе зоны досмотра, зоны ожидания, зоны обслуживания в кассах, зоны обращения к ЛВОКп [15, 16].

С использованием программного обеспечения AnyLogic в ходе работы были созданы

имитационные модели перемещения пассажиров в реальных условиях и с учетом выявленных негативных факторов при нахождении пассажиров в зоне ожидания. Выполненная оценка проходимости зон дала обоснование необходимости разделения пассажиропотоков дальнего следования и пригородного сообщения на вокзальном комплексе Иркутск-Пассажирский [17, 18].

Применение различных методов моделирования производственных процессов сегодня относится к одной из важнейших траекторий развития современных цифровых технологий в стране и позволяет решать сложные задачи без значительных материальных затрат. Итог исследования показал, что использование продукта AnyLogic на инфраструктуре вокзала Иркутск-Пассажирский при сроке окупаемости менее одного года дает экономический эффект почти 7 млн руб. в год.

### Список литературы

1. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 18.09.2023).
2. Об утверждении типового технологического процесса работы железнодорожного вокзального комплекса : распоряжение ОАО «РЖД» от 23.09.2020 № 2072/р (ред. 10.10.2022). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
3. ГОСТ Р 58171-2018. Услуги на железнодорожном транспорте. Требования к обслуживанию пассажиров на вокзальных комплексах. Введ. 2018–12–01. М. : Стандартинформ, 2018. 22 с.
4. Рудин Р.Ю. Решение транспортных задач с помощью имитационного моделирования // Достижения науки и образования. 2016. № 11 (12). С. 12–16.
5. Устинова Е.С. Умный вокзал. Концептуальные решения «smart-вокзал» ОАО РЖД // Синергия наук. 2021. № 55. С. 338–347.
6. Особенности моделирования пассажиропотока объектов транспортной инфраструктуры / С.П. Вакулenco, Н.Ю. Евренова, О.И. Коровкина и др. // Экономика железных дорог. 2021. № 7. С. 41–47.
7. AnyLogic : сайт. URL : <https://www.anylogic.ru/> (Дата обращения 11.09.2023).
8. Никонова Я.И., Проскурякова Е.А. Цифровизация железнодорожных вокзальных комплексов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т. 8. № 3. С. 31–44.
9. Елуферьева Ю.С., Пальмов С.В. Моделирование работы железнодорожного вокзала средствами AnyLogic // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12-1 (78). С. 121–127.
10. Свистунова А.С., Хасанов Д.С., Кравец Д.М. Имитационное моделирование на железнодорожном вокзале в программной среде AnyLogic // Системный анализ и проектирование в управлении : сб. науч. тр. XXIV Междунар. науч. и учеб.-практ. конф. СПб., 2020. Ч. 2. С. 274–282.
11. Свистунова А.С., Хасанов Д.С. Имитационное моделирование процессов обслуживания пассажиров на железнодорожном вокзале // Транспорт России: проблемы и перспективы-2020 : материалы Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2020. Т. 2. С. 28–32.
12. Svistunova A.S. Using the AnyLogic software product in modeling the passenger traffic of a railway station // Computing, Telecommunications and Control. 2020. Vol. 13. № 4. P. 54–65.
13. Козлов П.А., Колокольников В.С., Копылова Е.В. Об имитационном моделировании и имитационных системах // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 3–6.
14. Смесова К.С., Кандрашина Т.Е., Баусова З.И. Имитационная модель системы обслуживания пассажиров железнодорожного вокзала // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. ст. XVII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2017. С. 211–215.
15. Чубарова И.А. Вокзалы. Иркутск : Изд-во ИргУПС, 2014. 168 с.
16. Самуйлов В.М., Медовщиков И.А., Каргапольцева Т.А. Железнодорожный вокзал будущего // Инновационный транспорт. 2020. № 1 (35). С. 3–10.
17. Черенцов Д.Ю., Холомеева Н.В. Модернизация инженерных сетей пассажирских железнодорожных комплексов в соответствии с их современными функциями // Политранспортные системы : материалы XI междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2020. С. 198–202.
18. Майоров Н.Н., Романек В.А. Вопросы выбора математических моделей для исследования пассажирских потоков в транспортных системах // Системный анализ и логистика. 2017. № 1 (14). С. 39–45.

## References

1. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed September 18, 2023).
2. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 23.09.2020 № 2072/r (red. 10.10.2022) «Ob utverzhdenii tipovogo tekhnologicheskogo protsessa raboty zheleznodorozhnogo vokzal'nogo kompleksa» [Order of JSC «Russian Railways» dated September 23, 2020 No 2072/r (ed. October 10, 2022) «On approval of the standard technological process of the railway station complex»].
3. GOST R 58171-2018. Uslugi na zheleznodorozhnom transporte. Trebovaniya k obsluzhivaniyu passazhirov na vokzal'nykh kompleksakh [State Standard R 58171-2018. Services in railway transport. Requirements for passenger service at railway stations]. Moscow: Startinform Publ., 2018. 22 p.
4. Rudin R.Yu. Reshenie transportnykh zadach s pomoshch'yu imitatsionnogo modelirovaniya [Solving transport problems using simulation modeling]. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya* [Achievements of science and education], 2016, no. 11(12), pp. 12–16.
5. Ustinova E.S. Umnyi vokzal. Kontseptual'nye resheniya «smart-vokzal» OAO RZhD [Smart station. Conceptual solutions for the «smart station» of JSC «Russian Railways»]. *Sinerhiya nauk* [Synergy of Sciences], 2021, no. 55, pp. 338–347.
6. Vakulenko S.P., Evreenova N.Yu., Korovkina O.I., Alekseeva K.V. Osobennosti modelirovaniya passazhiropotoka ob'ektov transportnoi infrastruktury [Features of passenger traffic modeling of transport infrastructure facilities]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economy of railways], 2021, no. 7, pp. 41–47.
7. AnyLogic. Available at: <https://www.anylogic.ru/> (Accessed September 18, 2023).
8. Nikonova Ya.I., Proskuryakova E.A. Tsifrovizatsiya zheleznodorozhnykh vokzal'nykh kompleksov [Digitalization of railway station complexes]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Innovative transport systems and technologies], 2022, vol. 8, no. 3, pp. 31–44.
9. Elufer'eva Yu.S., Pal'mov S.V. Modelirovanie raboty zheleznodorozhnogo vokzala sredstvami Anylogic [Modeling of the railway station operation by means of Anylogic]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International scientific research journal], 2018, no. 12-1(78), pp. 121–127.
10. Svistunova A.S., Khasanov D.S., Kravets D.M. Imitatsionnoe modelirovanie na zheleznodorozhnom vokzale v programnoi srede AnyLogic [Simulation modeling at a railway station in the AnyLogic software environment]. *Sbornik nauchnykh trudov XXIV Mezhdunarodnoi nauchnoi i uchebno-prakticheskoi konferentsii «Sistemnyi analiz i proektirovanie v upravlenii» (v 3 ch.)* [Proceedings of the XXIV International Scientific and educational-practical conference «System analysis and design in management» (in 3 parts)]. Saint Petersburg, 2020, part 2, pp. 274–282.
11. Svistunova A.S., Khasanov D.S. Imitatsionnoe modelirovanie protsessov obsluzhivaniya passazhirov na zheleznodorozhnom vokzale [Simulation modeling of passenger service processes at a railway station]. *Materialy Yubileinoi mezhdunarodnoi-nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport Rossii: problemy i perspektivy-2020»* [Proceedings of the Jubilee International scientific and Practical conference «Transport of Russia: problems and prospects-2020»]. Saint Petersburg, 2020, vol. 2, pp. 28–32.
12. Svistunova A.S. Using the AnyLogic software product in modeling the passenger traffic of a railway station. *Computing, Telecommunications and Control*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 54–65.
13. Kozlov P.A., Kolokol'nikov V.S., Kopylova E.V. Ob imitatsionnom modelirovanii i imitatsionnykh sistemakh [About simulation modeling and simulation systems]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2019, no. 1(60), pp. 3–6.
14. Smesova K.S., Kandrashina T.E., Bausova Z.I. Imitatsionnaya model' sistemy obsluzhivaniya passazhirov zheleznodorozhnogo vokzala [Simulation model of the railway station passenger service system]. *Sbornik statei XVII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike»* [Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference «Problems of informatics in education, management, economics and technics»]. Penza, 2017, pp. 211–215.
15. Chubarova I.A. Vokzaly [Train stations]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2014. 168 p.
16. Samuilov V.M., Medovshchikov I.A., Kargapol'tseva T.A. Zheleznodorozhnyi vokzal budushchego [Railway station of the future]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2020, no. 1 (35), pp. 3–10.
17. Cherentsov D.Yu., Kholomeeva N.V. Modernizatsiya inzhenernykh setei passazhirskikh zheleznodorozhnykh kompleksov v sootvetstvi s ikh sovremennymi funktsiyami [Modernization of engineering networks of passenger railway complexes in accordance with their modern functions]. *Materialy XI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Politransportnye sistemy»* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference «Polytransport systems»]. Novosibirsk, 2020, pp. 198–202.
18. Mayorov N.N., Romanek V.A. Voprosy vybora matematicheskikh modelei dlya issledovaniya passazhirskikh potokov v transportnykh sistemakh [Issues of choosing mathematical models for studying passenger flows in transport systems]. *Sistemnyi analiz i logistika* [System analysis and logistics], 2017, no. 1 (14), pp. 39–45.

## Информация об авторах

**Чубарова Ирина Александровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: ia7chubarova@gmail.com.

**Доможирова Алена Дмитриевна**, старший преподаватель кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: zenitalena@mail.ru.

## Information about the authors

**Irina A. Chubarova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: ia7chubarova@gmail.com.

**Alena D. Domozhirona**, Assistant Professor of the Department of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: zenitalena@mail.ru.

## Фактор технологической прецизионности в алгоритме конструктивной эволюции буксового узла грузовых вагонов

В.В. Тюньков✉, Ю.В. Воронова, Л.В. Мартыненко, Солонго Болдбаатар

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

✉tunkov@bk.ru

### Резюме

В статье рассмотрена тенденция выбора композиционного решения по параметру прецизионности при реализации модели в работоспособное устройство, приобретающее для выполнения своей основной функции новое конструктивное предложение, уровень совершенства которого определяется назначенным ресурсом. В качестве адекватного примера использован буксовый узел грузового вагона, реагирующий на все нагрузки и воздействия в процессе движения. Решение общей задачи предполагается не только в ракурсе инновационного технологического обеспечения производства и ремонта, но также создания объективно более целесообразных конструктивных композиций с преимущественной локализацией материалов и деталей и максимизацией импортозамещения. Осуществлено предварительное обобщение в эволюции буксового узла грузового вагона в связи с развитием прецизионности, основой которого в настоящее время является роликовый подшипник, выполняющий адаптивную роль передачи вертикальной нагрузки, и наличием новых конструкционных материалов, когда проявляется возможность превентивной рационализации, особенно для повышения уровня надежности и общего ресурса. Подтверждается свойство «изотропности» рассматриваемого для использования в конструкции подшипника материала, которая наряду с декларируемыми параметрами (низким коэффициентом трения ~ 0,02 и высокой твердостью ~ 32 ГПа) позволяет смягчить уровень требований к прецизионности в технологии изготовления и назначении ограничений в процессе эксплуатации буксового узла в целом. В работе осуществляется очередная попытка с целью развития исходной позиции представить технологически реальный прикладной аспект для алгоритма оптимизации узла по критерию «прецизионность», обеспечиваемая текущим состоянием науки и производства. Критически важным в композиции буксового узла является узел трения, который эксплуатируется в очень широком диапазоне воздействий и нагрузок. Оценивается эволюционная композиция на основе нового антифрикционного материала (AlMgB<sub>14</sub>) в схеме «подшипника скольжения» по возможным сравнительным расчетам в компьютерной программе типа ANSYS и при назначенном критерии улучшения. Показано, что решение задачи в рамках технологического алгоритма с пошаговой оптимизацией влияния на процесс эволюции конструктивного решения тяжело нагруженного узла грузового вагона, передающего широкий спектр воздействий, технически и математически выполнимо и после специализированного экспериментального подтверждения доступно к отраслевому использованию.

### Ключевые слова

конструктивная эволюция, моделирование, ресурс, адаптация, буксовый узел, прецизионность, импортозамещение

### Для цитирования

Фактор технологической прецизионности в алгоритме конструктивной эволюции буксового узла грузовых вагонов / В.В. Тюньков, Ю.В. Воронова, Л.В. Мартыненко, Солонго Болдбаатар // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 39–53. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).39-53.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 18.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 05.12.2023 г.; принята к публикации: 06.12.2023 г.

## Factor of technological precision in the algorithm of constructive evolution of the axle box unit of freight wagons

V.V. Tyun'kov✉, Yu.V. Voronova, L.V. Martynenko, Solongo Boldbaatar

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

✉tunkov@bk.ru

### Abstract

The tendency is considered of choosing a compositional solution according to the precision parameter when implementing a model into a workable device, which, in order to perform its main function, can acquire a new design solution, the whose level of perfection is determined by the assigned resource. As an adequate example, we used the axle box unit of a freight car, responsive to all loads and influences during the movement. The solution to the general problem is expected from not only the perspective of innovative technological support for production and repair, but also the creation of objectively more appropriate structural compositions with preferential localization of materials and parts, as well as maximizing import substitution. A preliminary generalization has been made in the evolution of the axle box unit of a freight wagon in connection with the development of precision in



manufacturing processes whose basis currently being a roller bearing, which plays an adaptive role of transmitting vertical loads, and the presence of new structural materials as well as the availability of new structural materials, when the possibility of preventive rationalization appears, especially to increase the level of reliability and overall service life. The «isotropic» property of the material considered for use in the bearing design is confirmed, which, along with the declared parameters (low coefficient of friction  $\sim 0,02$  and high hardness  $\sim 32$  GPa), makes it possible to mitigate the level of precision requirements in manufacturing technology and the assignment of restrictions during the operation of the axle box unit in general. The article makes another attempt to develop the original position to present a technologically realistic applied aspect for the node optimization algorithm according to the criterion of precision, provided by the current state of science and production. Critically important in the composition of the axle box unit is the friction unit, which is operated in a very wide range of impacts and loads. An evolutionary structural composition based on a new antifriction material (AlMgB<sub>14</sub>) in the «sliding bearing» design scheme is evaluated using possible comparative calculations in a computer program such as ANSYS and with an assigned optimization criterion. It is shown that solving the problem within the framework of a technological algorithm with step-by-step optimization of the influence on the process of evolution of a structural solution of a heavily loaded freight car unit transmitting a wide range of influences is technically and mathematically feasible and, after specialized experimental confirmation, is available for industry use.

### Keywords

constructive evolution, modeling, resource, adaptation, axle box, precision, import substitution

### For citation

Тюньков В.В., Воронова Ю.В., Мартыненко Л.В., Болдбаатар Солонго. Фактор технологической прецизионности в алгоритме конструктивной эволюции буксового узла грузовых вагонов [Factor of technological precision in the algorithm of constructive evolution of the axle box unit of freight wagons]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 39–53. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).39-53.

### Article info

Received: October 18, 2023; Revised: December 5, 2023; Accepted: December 6, 2023.

### Введение

Процесс рационализации высоконагруженных узлов и деталей железнодорожного подвижного состава, в том числе буксового узла, которому соответствует функция адаптации между обрессоренной и необрессоренной его частями, актуализирован, в частности, из-за необходимости импортозамещения. Решение общей задачи предполагается не только в ракурсе инновационного технологического обеспечения производства и ремонта, но также создания объективно более целесообразных конструктивных композиций. Для этого случая позиция прецизионности в технике становится в настоящее время приоритетной для реализации инновационного замысла оптимизации конструктивного решения узлов и деталей в отношении подтверждения кардинального роста эксплуатационного ресурса. Действительно, прецизионность выполнения операций при производстве и ремонте узлов и деталей железнодорожного подвижного состава, в том числе буксовых узлов, позволяет снизить уровень динамичности силовых воздействий, приводящих к износам и потенциальному выходу за нормативные предельные состояния.

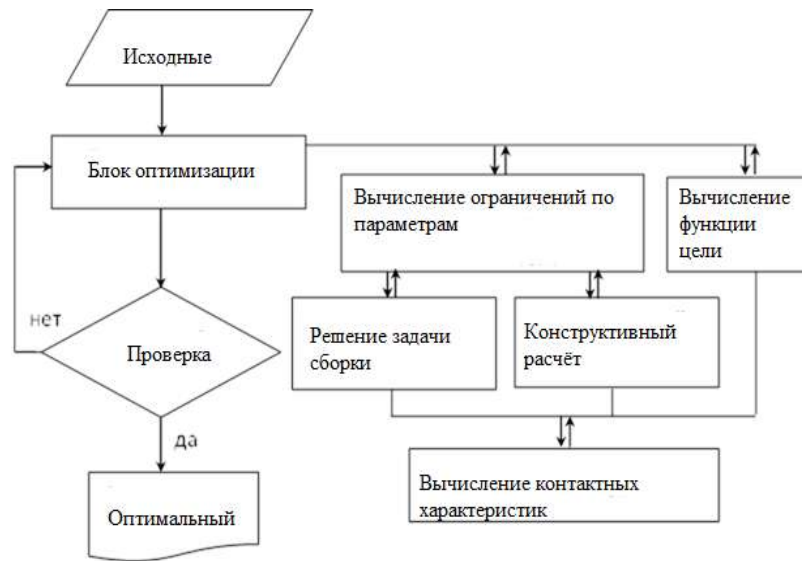
При таком подходе из числа буксовых узлов, находящихся в эксплуатации, наиболее перспективны узлы с коническим подшипником кассетного типа, установленным в корпус,

и бескорпусные буксы с коническим подшипником кассетного типа, которые более надежны и долговечны [1].

Критически важным в этой композиции является узел трения, т.е. подшипников качения и скольжения, которые эксплуатируются в очень широком диапазоне воздействий и нагрузок. Одной из научных и технических задач является снижение «отрицательной» динамики, которая приводит к повышенному износу с возможными отклонениями, близкими к предельным. В мировой практике для ряда случаев задача в пределах коридора нормативных значений решается с максимально возможной точностью и минимальными конструкторско-технологическими систематическими погрешностями (рис. 1).

В этом случае при каждом обращении к функциям ограничений превалирует необходимость решения задачи статического анализа, где определяются параметры состояния системы, в том числе при использовании правил технологического алгоритма [1, 2].

Таким образом, основной целью проводимого исследования становится попытка выбора рационального варианта конструктивного решения при достигнутом уровне прецизионности как в процессе изготовления, так и в период эксплуатации, плановых видах ремонта и техниче-



**Рис. 1.** Взаимосвязь основных блоков алгоритма оптимизации при прямом вычислении функции цели и ограничений

**Fig. 1.** Interrelation of the main blocks of the optimization algorithm when directly calculating the objective function and constraints

ского обслуживания узла. При системном подходе и использовании инновационных материалов сопредельной целью является увеличение ресурса, а также выполнение условий объективного импортозамещения.

### Описание тенденции

Принятый к исследованию буксовый узел грузового вагона характеризуется последовательной эволюцией конструкции подшипника, которая в своем развитии постоянно придерживалась тенденции повышения прецизионности как в изготовлении, так и монтаже (рис. 2).

Подшипник в составе буксового узла является тяжело нагруженным и к нему предъявляются повышенные технические требования. В связи с этим при их конструировании существует необходимость использования современных методов математического моделирования и рассмотрения альтернативных вариантов.

Буксовые узлы адаптивно передают нагрузки, формируемые внутренней кинематикой вагона и грузом на шейки осей, участвуют в линейризации вращения колесной пары с ограничением продольных и поперечных перемещений. Их классификация для грузовых ва-



**Рис. 2.** Схема силового взаимодействия буксового узла грузового вагона

**Fig. 2.** Diagram of power interaction of axle box unit of a freight wagon

гонов в настоящее время включает следующие виды:

- с двумя цилиндрическими подшипниками;
- с одним коническим подшипником касетного типа, установленным в корпус;
- бескорпусные буксы с коническим подшипником касетного типа.

При этом признаны наиболее перспективными типы буксовых узлов с подшипниками касетного типа, которые объективно более надежны и обладают большим ресурсом [1]. В большинстве случаев рационализируются следующие задачи:

- сохранение достигнутого уровня норматива безопасности в условиях интенсификации движения;
- снижение массы необрессоренных частей подвижного состава;
- сокращение эксплуатационных затрат на техническое обслуживание и плановый ремонт;
- облегчение процессов монтажа и демонтажа букс;
- увеличение межремонтных сроков эксплуатации, сопоставимых со сроками жизненного цикла основных сборочных единиц вагонов.

Основопологающим принципом в конструктивной эволюции является принцип прецизионности деталей композиции, взаимодействующих в пределах внутренней кинематики узла и вагона в целом. В текущем периоде существенным фактором становится возможность реализации потенциала импортозамещения.

Представим конструктивную эволюцию с этой точки зрения при условии роста значимости прецизионности от № 1 до 4 (табл.).

За исключением № 4 все приведенные схемы подшипников полностью прошли циклы эксплуатационной проверки и испытаний, включая численные эксперименты на основе пакетов компьютерных программ, поэтому достаточно полно используются в мировой практике. В связи с развитием прецизионности в технологических процессах изготовления и появлением новых конструкционных материалов открывается возможность рационализации, особенно для повышения уровня надежности и общего ресурса. Все подшипники, кроме № 4, требуют эффективной смазки контактирующих поверхностей, чтобы компенсировать их шероховатость, а также геометрические искажения колец, вероятных при критических нагрузках. При этом смазочная композиция используется для охлаждения подшипника.

В процессе интенсивной эксплуатации, а также в условиях, требующих повышенной надежности и увеличения общего ресурса в целом, необходима высокая однородность реакции деталей узла на ситуационные воздействия, в том числе экстремальные. Наряду с напольными диагностическими комплексами типа КТСМ, необходим расчет скважности их размещения. Общепринятые вероятностные методы при нормальных и других распределениях дают часто существенные отклонения, и для данного случая предлагается дополнительно использовать теорию нечетких множеств.

Условный балл прецизионности и ресурса для подшипников буксового узла грузовых вагонов  
Conditional precision and resource score for bearings of the axle box of freight wagons

№	Наименование класса Class name	Прецизионность, балл Precision, score	Ресурс, балл Resource, score	Паллиативная схема Palliative scheme	Локализация в РФ, % Localization in the RF, %
1	Скольжения Plain	1	1,5		100
2	Роликовый Roller	5	1		100
3	Касетный Cassette	8	2		70
4	Скольжения (прецизионный со слоем антифрикционного композита) Plain (precision, with a layer of antifriction composite)	8	3		100

В ряде исследований подтверждается, что в условиях многопараметровости изменение свойств со временем усиливает ее в формировании потенциала внутреннего сопротивления конструкции узла (детали) [3].

В данном случае определенный практический результат может быть получен за счет использования приемов на основе нечетких множеств. Если  $n$  параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$  характеризуются соответственно функциями принадлежности  $\mu_{x_1}(x_1), \mu_{x_2}(x_2), \mu_{x_n}(x_n), \dots$ , которые образуют векторную функцию принадлежности, то вектор  $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^t$   $n$ -компонентный вектор нечеткой переменной. Нечеткая переменная на выходе  $y(t)$  будет характеризоваться функцией принадлежности  $\mu_y(y; t)$ , которая может быть функцией от  $t$  или скалярной величиной, измеренной при неразрушающем контроле на оптимизируемом этапе.

В общем виде функция может быть выражена:

$$\mu_{\tilde{y}}(y; t) = \Phi \left[ \mu_{\tilde{X}_1}(x_1), \mu_{\tilde{X}_2}(x_2), \dots, \mu_{\tilde{X}_n}(x_n); t \right],$$

где  $\Phi$  – нелинейная алгебраическая функция времени  $t$ , т.е. отображение  $X \rightarrow Y$ , где  $X$  – прямое произведение  $X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n$ ,  $X_i \in R^1$  и  $Y_i \in R^1$ . Влияние целевой функции  $Y$  относительно  $n$  нечетких параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$  определяется уравнением:

$$\mu_{\tilde{y}}(y; t) = \Phi \left[ t; \mu_{\tilde{y}}(y), \mu_{\tilde{x}_1}(x_1), \mu_{\tilde{x}_2}(x_2), \dots, \mu_{\tilde{x}_n}(x_n) \right] = \frac{1 - \mu_{\tilde{y}}(y)}{1 - \omega_1 \mu_{\tilde{x}_1}(x_1) - \omega_2 \mu_{\tilde{x}_2}(x_2) - \dots - \omega_n \mu_{\tilde{x}_n}(x_n)},$$

где  $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1$  и  $0 \leq \omega_i \leq 1$  для всех  $i$ .

В общем случае влияние технологического фактора – это функция от  $t$  и функция принадлежности  $y, x_1, \dots, x_n$ . Величина  $1 - \mu_y(y)$  оценивает отклонение от «нормального» значения.

Если при некотором частном случае все параметры одинаково существенны, то  $\omega_i = 1/n$  при всех  $i$ . При анализе, в зависимости от имеющегося объема информации, часть констант назначается субъективно (чаще всего они отражают особые условия проектирования) другие определяются объективно на основе детерминированной математической модели или целевой функции и выступают в качестве необходимых ограничений.

Полезная для сравнения вариантов задача «упруго-гидродинамического контакта» ролика с поверхностью хорошо изучена для стационарного случая и рассматривалась во многих публикациях [4–9], но не является универсальной, так как превалирующее значение имеет радиус ролика, который должен быть мал по сравнению с радиусом кольца, по которому он катится, и поэтому в предварительных расчетах внешнее кольцо подшипника приближенно аппроксимируется плоской пластиной [10].

Представим вариант контактного взаимодействия цилиндрического ролика с движущейся пластиной, покрытой смазочным материалом (рис. 3).

Здесь распределение давления в смазочном слое определяется в теории известным уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 6\mu V \frac{\partial h}{\partial x} + 6\mu h \frac{\partial V}{\partial x} + 12\mu \frac{\partial h}{\partial t},$$

где  $P$  – давление в смазочном слое;  $V$  – ско-

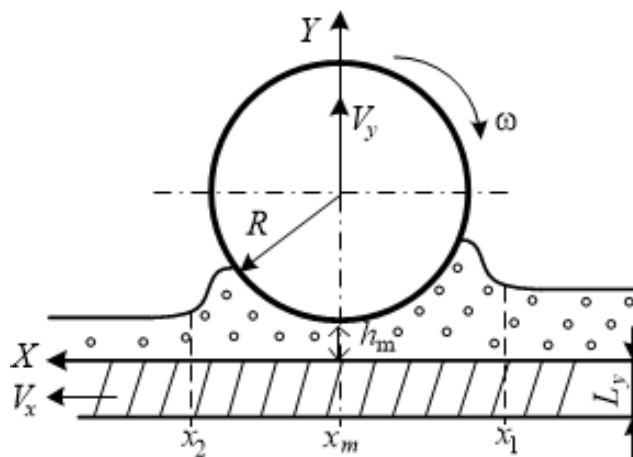


Рис. 3. Схема кинематики ролика с кольцом (пластиной) через слой смазочного материала  
Fig. 3. Diagram of the kinematics of a roller with a ring (plate) through a layer of lubricant

рость движения наружного кольца подшипника;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $h$  – толщина смазочного слоя, зависящая от деформации поверхностей. Ось  $x$  ориентирована в направлении движения наружного кольца (пластины). Для уточнения расчетной зоны контакта используем интегральное уравнение связи давления  $P$  и деформации  $\delta$ :

$$K(x - x') = \frac{2(1 - m^2)}{\pi E} \operatorname{Ln} \left( \frac{2L}{|x - x'|} \right),$$

где  $K(x - x')$  – функция податливости;  $m$  и  $E$  – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала.

В гидродинамической фазе смазочная жидкость (см. рис. 3) оказывает сопротивление движению и требует определения коэффициента демпфирования смазочного слоя, т.е. значения несущей способности, являющейся функцией параметра  $\nu$ :

$$W'(\nu) = \int_a^c q(x) dx = \int_a^c q_0(x) dx + 2\nu \int_a^c q_1(x) dx \equiv W'_0 - W'_1 \nu,$$

где  $W'$  – безразмерная несущая способность.

Это значение при  $\nu = 0$  для ролика равняется максимальной подъемной силе при постоянной вязкости и определяется по формуле:

$$W'_0 = \frac{2,45 \cdot V \cdot \mu}{h^3 \cdot 2R}.$$

Участвующая в этом процессе энергия способствует нагреву и, соответственно, изменению физических свойств компонентов. По этой причине, в частности, кассетные подшипники (см. табл.) обладают повышенной нормированной рабочей температурой, но в результате прецизионности композиции дают повышенную однородность процесса. В сравнительных расчетах, например в программе ANSYS [11], для определения упругих деформаций пластины и ролика могут быть исследованы зависимости несущей способности и коэффициента демпфирования смазочного слоя от величины минимального зазора между роликом и пластиной, т.е. объективной прецизионности. Трудности при расчетах в присутствии «прецизионности» усложняют использование мультидисциплинарных программных комплексов из-за наличия очень тонких слоев, практически пленок, критических перепадов давления и жесткости нестационарных задач, требующих

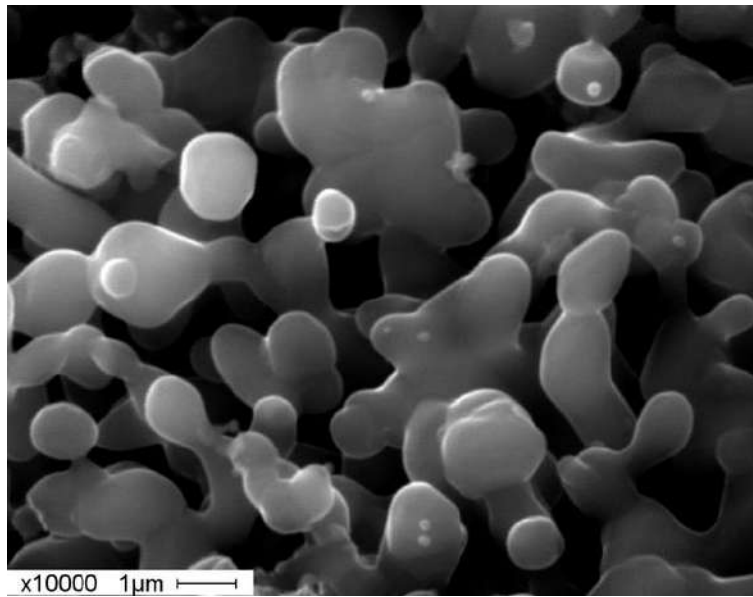
выбора «очень мелких шагов по времени и пространству» [12, 13]. В связи с этим по результатам исследования вариантов необходима экспериментальная проверка или априорное определение границ изменения параметров компонентов для рассматриваемой композиции. В отличие от прецизионной композиции гидродинамическая схема предполагает развитие определенной кавитационной ситуации, исследованной в [14, 15].

### Прикладной аспект

В связи с изложенной тенденцией возникает предложение функциональной замены обычной смазки другим антифрикционным материалом, обладающим улучшенными параметрами в реальном диапазоне температур и давлений. Например, «получен супертвердый керамический порошок материал («скользящая керамика») – алюмомагниево-борид  $\text{AlMgB}_{14}$ . Сплав бора, магния и алюминия характеризуется высокой твердостью  $\approx 32$  ГПа и очень низким коэффициентом трения  $\approx 0,02$ . К примеру, у тефлона коэффициент трения составляет  $0,04-0,1$ , а у хорошо смазанной стали – не менее  $0,16$ . Керамический порошок материал на основе  $\text{AlMgB}_{14}$  имеет отличную стойкость к абразивному износу и эрозии, хорошую химическую инертность и термическую стойкость» [16, 17].

Рассматривая представленную микроструктуру, целесообразно отметить аморфную структуру материала в образцах, что позволяет предположить однородность свойств (изотропность), по крайней мере в тонких пленках, наносимых на матрицу (контактирующую поверхность вкладыша) (рис. 4) [17].

Видимая изотропность рассматриваемого материала наряду с декларируемыми параметрами (низким коэффициентом трения  $\sim 0,02$  и высокой твердостью  $\approx 32$  ГПа) позволяют смягчить уровень требований к прецизионности в технологии изготовления и назначении ограничений в процессе эксплуатации буксового узла в целом, т.е. используя этот материал. по-видимому, возможен переход от варианта № 1 к варианту 4 (см. табл.). Аналогичный материал, полученный в 1999 г. сотрудниками Эймсовской лаборатории Министерства энергетики США (г. Эймс, штат Айова) также обладает низким коэффициентом трения –  $0,02$ , а по твердости композит уступает лишь алмазу и



**Рис. 4.** Микроструктура СВС-алюмомагниевого борида  $AlMgB_{14}$   
**Fig. 4.** Microstructure of SHS – the aluminum-magnesium boride  $AlMgB_{14}$

другому особо твердому веществу – кубическому нитриду бора.

Таким образом, воспользуемся полезными для нас подтвержденными данными (коэффициентом трения  $\approx 0,02$ , высокой твердостью  $\approx 32$  ГПа и аморфной микроструктурой) при установлении исходных основных данных инновационного прецизионного подшипника скольжения, показывающего ресурс, соразмерный «кассетному» (см. табл.). Кроме того, подтвердим, что подшипники скольжения должны удовлетворять следующим критически важным

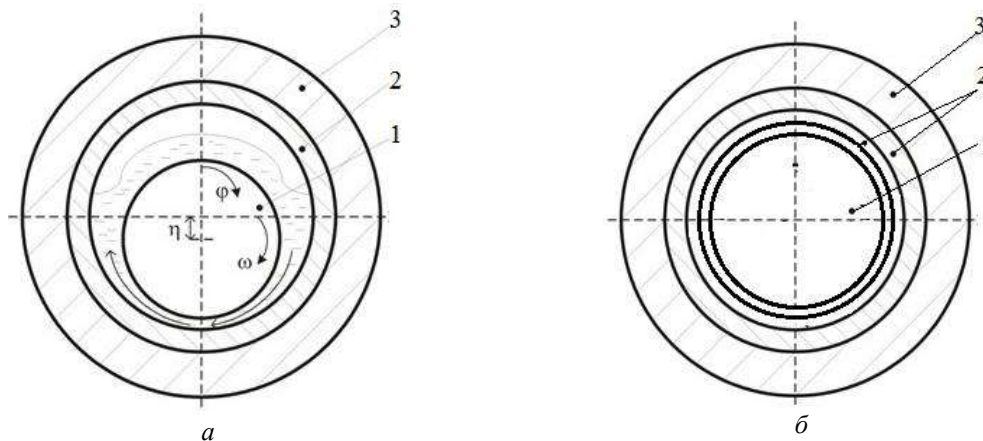
требованиям:

– конструкция деталей и материалы должны быть такими, чтобы потери на трение и износ были минимальными;

– соответствовать по ресурсу узлу в целом, быть достаточно жесткими и прочными;

– площади контакта их трущихся поверхностей должны быть достаточными для восприятия действующего на них давления;

– контроль соответствия регламенту, установка и обслуживание должны быть простыми;



**Рис. 5.** Геометрическая схема подшипника скольжения:  
*a* – гидродинамический (1 – вал, 2 – вкладыш, 3 – корпус);  
*б* – прецизионный (1 – вал, 2 – слой антифрикционного напыления, 3 – корпус)

**Fig. 5.** Geometric diagram of a plain bearing:  
*a* – hydrodynamic (1 – shaft, 2 – liner, 3 – body);  
*b* – precision (1 – shaft, 2 – layer antifricition coating, 3 – body)

– номинальная толщина слоя антифрикционного (смазочного) материала;

– исключать контакт микронеровностей трущихся поверхностей.

Предварительно рассмотрим конструкцию гидродинамического подшипника скольжения, который формируется цилиндрическим валом (осью), смазочным слоем, вкладышем и корпусом (рис. 5).

Здесь определяющим является условие распределения давления в смазочном слое из решения известного уравнения Рейнольдса:

$$\frac{1}{R_0^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \frac{1}{R_0} \frac{\partial hu}{\partial \varphi},$$

$$h = R_1 - R_0 + \eta \cos(\varphi) + \delta(P) \text{ при } P > 0,$$

$$\frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \text{ при } P \leq 0.$$

Здесь  $h$  – толщина смазочного слоя;  $\mu$  – коэффициент вязкости;  $u$  – средняя скорость поверхностей вала и вкладыша;  $y$  – координата вдоль оси цилиндрического подшипника;  $\varphi$  – азимутальный угол;  $\delta$  – радиальный прогиб поверхности вкладыша, зависящий от давления в смазочном слое.

Для расчета мощности тепловыделения  $Q$  для подшипника скольжения, работающего в гидродинамическом режиме, используется следующее выражение, которое в безразмерных величинах принимает вид:

$$Q = S \left[ H^3 \left[ \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{y}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{\varphi}} \right)^2 \right] + \frac{1}{H} \right],$$

где  $S = \frac{4\mu R^2 \omega^2}{d}$ , а поток тепла определяется

следующим выражением:

$$Q = 2\pi R_1 \cdot \left( -\chi \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

где  $\chi$  – коэффициент теплопроводности (для стали  $\chi = 47$  Вт / (м · °К)).

Далее получаем зависимость средней температуры при работе подшипника от мощности тепловыделения:

$$T = \frac{Q}{2\pi\chi} \ln \frac{R_3}{R_1} + T_0,$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды, °К.

Уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0$$

и его решение в виде разложения Фурье:

$$T = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi] + T_0,$$

где  $a_k$  и  $b_k$  – коэффициенты Фурье:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} T \cos k\varphi d\varphi,$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} T \sin k\varphi d\varphi,$$

а на внутренней границе при  $r = R_1$  имеем граничное условие для потока тепла из смазочного слоя

$$Q = -\chi \frac{\partial T}{\partial r},$$

где  $Q$  – мощность тепловыделения в смазочном слое.

На внешней границе температура окружающей среды  $T_0$ :

$$T(R_3) = T_0.$$

Сопоставляя решения для типа (см. рис. 5, а) и (см. рис. 5, б) констатируем, что теплопередача в конструкции на рис. 5, б несколько выше и подшипник работает в более мягком режиме, поскольку уменьшен слой смазки и отсутствует вкладыш, который функционально заменяет слой напыления антифрикционного материала (AlMgV<sub>14</sub>). Этот вариант прецизионного подшипника может работать без смазочного слоя практически не эродируя при «сухом» трении. Поскольку слой напыления упругий и подвержен в контакте деформациям, которые могут привести к появлению усталостных повреждений, то для оценок используем распространенный аналитический метод, основанный на гипотезе Винклера, которая предполагает линейную зависимость деформации поверхности от давления [18, 19].

Представим тонкий цилиндрический слой, считая, что его наружная поверхность сцеплена с абсолютно жестким корпусом. Покажем, что в первом порядке по  $\psi / R_1$  ( $\psi$  – толщина слоя;  $R_1$  – радиус внутренней поверхности) имеет место соотношение [18]:

$$\delta = D \cdot P,$$

где  $\delta$  – прогиб;  $P$  – давление;  $D$  – коэффициент податливости.

$$D = \frac{\Psi (1+m) \cdot (1-2m)}{E (1-m)},$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $m$  – коэффициент Пуассона.

Поскольку по условию перемещения  $u_r$ ,  $u_z$ ,  $u_\varphi$  равны нулю при  $r = R_2$  ( $R_2 = R_1 + \psi$  – радиус внешней поверхности вкладыша), то в окрестности  $r = R_2$

$$u_r = (r - R_2)u_{r,0}(z, \varphi) + o(r - R_2),$$

$$u_z = (r - R_2)u_{z,0}(z, \varphi) + o(r - R_2),$$

$$u_\varphi = (r - R_2)u_{\varphi,0}(z, \varphi) + o(r - R_2),$$

где  $u_{r,0}$ ,  $u_{z,0}$ ,  $u_{\varphi,0}$  – коэффициенты при  $(r - R_2)$  – стандартные математические обозначения для порядков малости величин:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{O(r)}{r} = \text{const}, \quad \lim_{r \rightarrow 0} \frac{o(r)}{r} = 0.$$

Из этого получаем для компонент тензора деформации слоя в окрестности  $r = R_2$

$$u_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r} = u_{r,0}(z, \varphi) + O(r - R_2),$$

$$u_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r \sin z} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} \frac{u_r}{r} + \text{ctg} z \frac{u_z}{r} = O(r - R_2),$$

$$u_{zz} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{u_r}{r} = O(r - R_2).$$

Отсюда следует, что в окрестности  $r = R_2$  упругое перемещение точек, расположенных на поверхности  $r = R_2$ , будет

$$\delta = \int_0^{-g} \frac{\partial u_r}{\partial r} dr = -g u_{r,0}(z, \varphi) + O(g^2).$$

В случае постоянного давления существует точное аналитическое решение задачи о деформации цилиндрического слоя (внутренний и наружный радиусы  $R_1$  и  $R_2$ ), внутри которой действует постоянное давление  $P$ . При этом наружное давление предполагается равным нулю. В общем случае равновесная деформация определяется следующим дифференциальным уравнением:

$$(1 - 2\sigma)\Delta \vec{u} + \text{grad div } \vec{u}.$$

Предполагая осевую симметрию, вводим цилиндрические координаты с осью  $z$  по оси трубы. При однородном вдоль трубы давлении деформация представляет собой чисто радиальные смещения. Поэтому  $\text{rot } \vec{u} = 0$  и уравнение приобретает следующий вид:

$$\nabla \text{div } \vec{u} = 0 \quad [18, 19].$$

Отличные от нуля компоненты тензора деформации:

$$u_{rr} = \frac{du}{dr} = a - \frac{b}{r^2}, \quad u_{\varphi\varphi} = \frac{u}{r} = a + \frac{b}{r^2},$$

из условий  $\sigma_{rr} = 0$  при  $r = R_2$  и  $\sigma_{rr} = -P$  при  $r = R_1$  находим:

$$a = \frac{PR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{(1+m) \cdot (1-2m)}{E},$$

$$b = \frac{PR_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{(1+m) \cdot (1-2m)}{E}.$$

Распределение напряжений по толщине дается формулами:

$$\sigma_{rr} = \frac{PR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2}\right), \quad \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{PR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_2^2}{r^2}\right),$$

$$\sigma_{zz} = 2m \frac{PR_1^2}{R_2^2 - R_1^2}.$$

В другом варианте граничных условий, упругий цилиндрический слой окружен бесконечно жесткой оболочкой. В этом случае деформация на внешней границе, естественно, равна нулю [18, 19].

Отсюда  $r = R_2$ :

$$ar + \frac{b}{r} = 0,$$

или

$$a = -\frac{b}{R_2}.$$

Распределение напряжений по  $r$  определяется формулой:

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{(1+m) \cdot (1-2m)} \left( (1-m)u_{rr} + mu_{\varphi\varphi} \right).$$

Давление равно напряжению с обратным знаком.

Подставляя соответствующие выражения в уравнение  $u = ar + \frac{b}{r}$ , находят деформацию поверхности при  $r = R_1$ :

$$\delta = \frac{P}{E} \frac{(1+m)(1-2m)R_1}{\left(2m \frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} - \frac{1}{R_1^2}\right)} \cdot \left( \frac{1}{R_2^2} - \frac{1}{R_1^2} \right).$$

Анализируя вариации результатов расчета для пакета воздействий на буксовый узел по каналам внутренней кинематики подвижного состава, например от автосцепки до головки рельса верхнего строения железнодорожного пути, отмечаем, что как в прямом, так и обратном направлениях они адаптируются им в стационарном и в динамическом виде. Вся сложность сочетания нагрузок воспринимается до-



статочной простой композицией узла, одним из определяющих условий которого является прецизионность и прочность контактирующих криволинейных поверхностей.

Конструкция данного подшипника достаточно проста (два кольца с напылением на внутренней или внешней поверхности контактного сопряжения), а оптимизационные расчеты при главном критерии – обеспечение прецизионности как по шероховатости контактной поверхности, так и жесткости общей геометрии – могут быть выполнены в одной из многих мультидисциплинарных компьютерных программ, например ANSYS [8, 10–13, 20] (рис. 6).

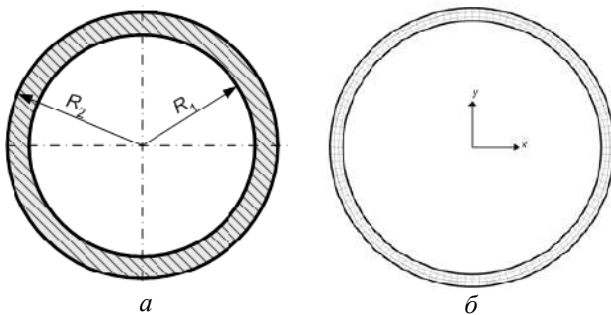


Рис. 6. Схема модели цилиндрической части: *a* – схема модели; *b* – сетка расчетной модели ( $R_1$  – внутренний радиус,  $R_2$  – внешний радиус)

Fig. 6. Diagram of the cylindrical part model: *a* – model diagram; *b* – computational model mesh ( $R_1$  – inner radius,  $R_2$  – outer radius)

Здесь во многих случаях физическая модель в виде рис. 6, *a* достаточна, поскольку слой напыления композита  $AlMgB_{14}$  достаточно тонок в сравнении с толщиной кольца и технологически жестко связан с основным материалом (матрицей), что его полностью демпфирует для любого вибрационного или другого воздействия. В связи с этим расчет на прочность (имея в виду физические параметры композита) антифрикционного слоя не производится, особенно из-за малоамплитудных напряжений в массиве и проявления их на контактной площадке. Причем прецизионность сопряжений объективно уменьшает амплитуду колебаний. При формировании матрицы жесткости достаточен треугольный элемент [8, 21, 22]. Он обладает «стабильной» точностью расчетов в местах градиентов напряжений ( $x$ ). Треугольные элементы вполне позволяют аппроксимировать также криволинейные границы и большинство алгоритмов автоматизированной подготовки и

оптимизации данных, которые ориентированы на треугольную форму [11, 20] (рис. 7).

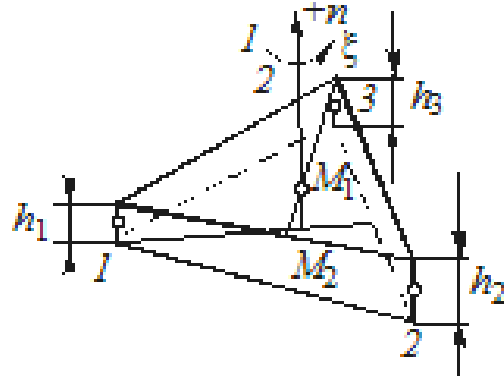


Рис. 7. Форма базовых конечных элементов  
Fig. 7. Form of basic finite elements

Отметим, что здесь узлы имеют по шесть степеней свободы  $X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ . В каждом из них, к примеру, задается толщина, модуль упругости, плотность, декартовы координаты узла. Определяя матрицы жесткости  $[K]$  и масс  $[M]$ , численно проинтегрируем выражения (с помощью квадратурной формулы Гаусса):

$$K = \int_V B^T D B dV, \quad M = \rho \int_V N^T N dV,$$

где  $B, D, N$  – соответственно матрицы дифференцирования перемещений, упругости и функций формы.

Фактор упругости для выбранной схемы прецизионного подшипника в числе превалирующих свойств при выборе материала колец является одним из основных и его матрица упругости при плоском напряженном состоянии  $D_m$  достаточно проста в предположении упругого поведения соотношения между напряжениями и деформациями – линейными, т.е.  $\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$ . Для частного случая плоского напряженного состояния рассматриваются три компоненты напряжений, соответствующие введенным деформациям [22]. В принятых обозначениях за-

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}.$$

Отсюда матрица  $D_m$  далее получается из обычных соотношений между напряжениями и деформациями для изотропного материала [22]:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x - \frac{\nu}{E} \sigma_y;$$

$$\varepsilon_y = \frac{-\nu}{E} \sigma_x + \frac{1}{E} \sigma_y;$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy},$$

которые относительно напряжений разрешаются как

$$D_m = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix},$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Деформации  $\{\varepsilon_m\}$  любого узла в треугольном элементе определяются из отношений:

$$\{\varepsilon_m\} = L \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = LN_m \{\delta_m\},$$

где  $L$  – линейный оператор.

В простых сечениях граничные условия задаются исходя из конструктивных соображений путем «подавления соответствующих степеней свободы в узлах», а матрицу геометрической жесткости, можно определить по формуле:

$$K_G = \frac{1}{2} \int_V G^T S G dv,$$

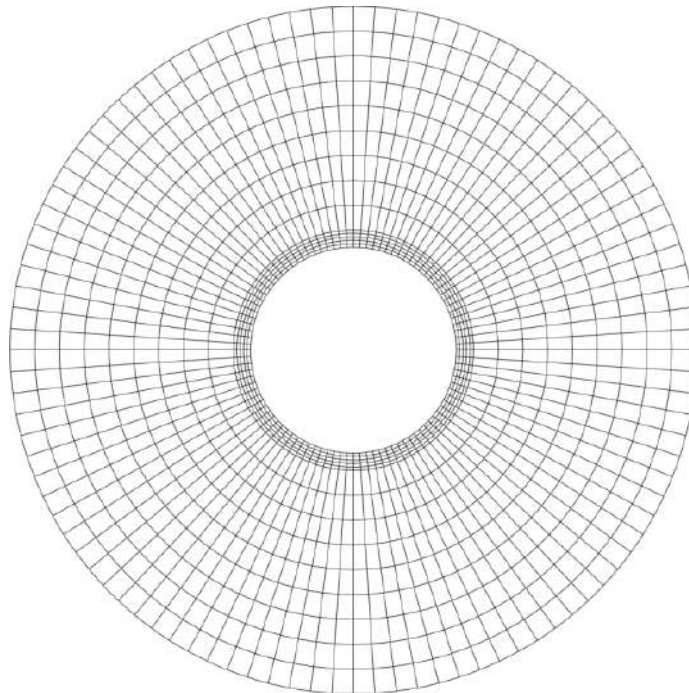
где  $S$  – матрица статических напряжений;  $G$  – матрица производных от перемещений.

В процессе потенциальной интенсификации эксплуатации железнодорожного подвижного состава на буксовые узлы, в силу разных причин, возможны экстремальные внешние динамические воздействия (см. рис. 2), которые сопоставимы по частоте с собственными колебаниями как для узла, так и отдельных деталей. Возникающие динамические напряжения при вынужденных колебаниях оцениваются при простом интегрировании системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

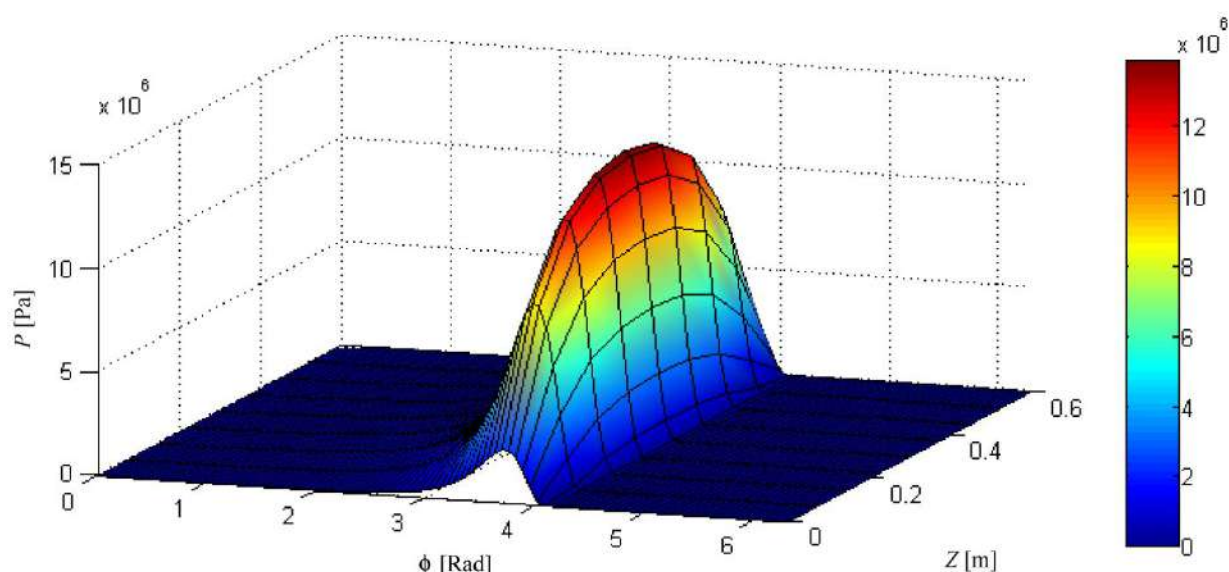
$$M(\delta_{\text{вын.}})'' + C(\delta_{\text{вын.}})' + K\delta_{\text{вын.}} = F(t),$$

где  $\delta_{\text{вын.}}(t)$  – вектор узловых вынужденных перемещений;  $(\delta_{\text{вын.}}(t))'$ ,  $(\delta_{\text{вын.}}(t))''$  – векторы скоростей и ускорений узлов конструкции;  $F(t)$  – вектор эквивалентных нагрузок для всей конструкции;  $C$  – матрица демпфирования;  $K$  – глобальная матрица «жесткости конструкции» и матрица «геометрической жесткости» от нагрузки;  $M$  – глобальная матрица масс для всей выделенной конструкции.

Рассмотрим частный случай деформации двухслойной конструкции (см. рис. 5, а). Внутренний тонкий слой композита окружен внешним толстым слоем из стали. Граничные условия: перемещения по внешнему радиусу стальной оболочки полагаем равными нулю. Геометрические параметры:  $R_1 = 0,03$  м;  $R_2 = 0,035$  м;  $L = 0,06$  м – длина цилиндра. Характеристи-



**Рис. 8.** Схема расчетной сетки для двухмерной модели ANSYS  
**Fig. 8.** Scheme of the computational mesh for a two-dimensional ANSYS model



**Рис. 9.** Форма распределения давления  
**Fig. 9.** Pressure distribution shape

ки материалов:  $E_{ст} = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па – модуль упругости стали;  $m_{ст} = 0,3$  – модуль Юнга стали. Сетка модели разбита на девять элементов по длине, на четыре элемента по толщине стальной оболочки и на сто элементов по углу (рис. 8) [18].

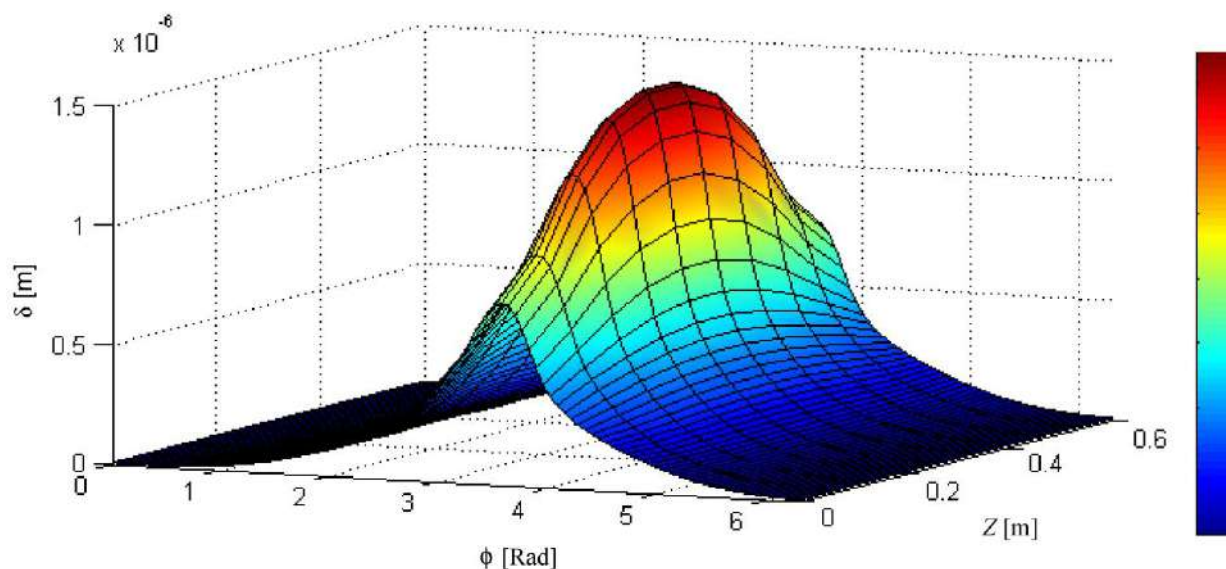
В данном случае нагрузка обеспечивается заданным распределением давления на внутренней поверхности (рис. 9).

Величина изменения в распределении давления по образующей  $L$  (длине) цилиндра зависит от конструктивного решения подшипника и

буксового узла в целом и некоторых других параметров, переменных в процессе эксплуатации и режима флуктуаций внутриузловых нагрузок и внешних воздействий. Их амплитуда невелика и вполне засчитывается при реальном инженерном конструировании с учетом критерия выбора оптимального решения.

После моделирования для лучшей визуализации по полученным данным строим поверхность прогиба (рис. 10).

В сложнагруженных узлах при восприятии малоцикловых динамических воздей-



**Рис. 10.** 3D-функция прогиба  
**Fig. 10.** 3D deflection function

ствий, а также параметров вибрационного воздействия большое значение имеет степень демпфирования.

Здесь возможны транзитные резонансные взаимодействия, где буксовый узел служит технологическим адаптером между обрессоренной и необрессоренной массами грузового вагона, активно участвуя в процессе движения, особенно по кривым малого радиуса на горно-перевальных участках и развивающимся дефектам верхнего строения железнодорожного пути.

### Заключение

Выбор композиционного решения путем оптимизационных сравнений вариантов по критерию прецизионности позволяет в рамках алгоритма конструктивной эволюции предположить не столько усложнение технологического процесса изготовления, монтажа и сервисного экс-

плуатационного обеспечения, сколько упрощение внутриузловой и внешней кинематики с полным выполнением нормируемых допусков по надежности и общему ресурсу. Решение задачи в рамках технологического алгоритма с пошаговой оптимизацией влияния на процесс эволюции конструктивного решения тяжело нагруженного узла грузового вагона, передающего широкий спектр воздействий, технически и математически выполнимо и после специализированного экспериментального подтверждения доступно к отраслевому использованию. При этом возможно новое конструктивное решение буксового узла, в том числе для грузовых вагонов, которое не предполагает полного возврата к прежнему конструктивному решению середины XX в., но включает все новые требования по надежности и ремонтно-пригодности.

### Список литературы

1. Калетин С.В., Гончаров С.Г., Конечский А.К. Переход на кассету: в поисках оптимального решения // Вестн. инта проблем естественных монополий: техника железных дорог. 2019. № 4 (48). С. 6–9.
2. Тюньков В.В., Бузунова В.С., Пашков А.Е. Технологический алгоритм в перспективном конструктивном развитии железнодорожных грузовых вагонов колеи 1520 мм // Молодая наука Сибири. 2020. № 4 (10). С. 18–26. URL [https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles\\_pdf\\_files/tyunkov.pdf](https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/tyunkov.pdf) (дата обращения 18.06.2023).
3. Ванг П.Ф., Тогай М. Анализ нечеткой чувствительности и метод синтеза // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения : сб. ст. М. : Радио и связь, 1986. С. 377–390.
4. Галахов М.А., Гусятников П.Б., Новиков А.П. Математические модели контактной гидродинамики. М. : Наука, 1985. 294 с.
5. Задорожная Е.А., Караваев В.Г. Оценка теплового состояния сложнонагруженного подшипника с учетом реологических свойств смазочного материала // Двигатели внутреннего сгорания. 2012. № 2. С. 66–73.
6. Современная трибология: итоги и перспективы / Э.Д. Браун, И.А. Буяновский, Н.А. Воронин и др. М. : ЛКИ, 2008. 480 с.
7. Капица П.Л. Гидродинамическая теория смазки при качении // Журнал технической физики. 1955. Т. 25. № 4. С. 747–762.
8. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. М. : Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
9. Механика контактных взаимодействий / С.М. Майзикович, В.М. Александров, И.И. Аргатов и др. М. : Физматлит, 2001. 670 с.
10. A numerical approach for the analysis of deformable journal bearings / D. Denasciutti, M. Gallina, M. Gh. Munteanu et al. // Frattura ed Integrità Strutturale. 2012. Vol. 21. P. 37–45. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.21.05.
11. Чигаев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. М. : Машиностроение-1, 2004. 511 с.
12. Bair S.S. High-Pressure Rheology for quantitative elastohydrodynamics. Amsterdam : Elsevier, 2007. 250 p.
13. Bissett E.J., Spence D.A. The Line Contact Problem of Elastohydrodynamic Lubrication. II: Numerical Solutions of the Integrodifferential Equations in the Transition and Exit Layers // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1989. Vol. 424. № 1867. P. 409–429.
14. Fortier A.E. Numerical Simulation of Hydrodynamic Bearings with Engineered Slip/No-Slip Surfaces. Atlanta : Georgia Institute of Technology, 2004. 90 p.
15. Fortier A. E. Numerical Simulation of a Slider Bearing with an Engineered Slip/No-Slip Surface and Lubrication Engineering // 14th International Colloquium Tribology. Esslingen am Neckar, 2004. P. 1699–1704.
16. Пат. № 2697146 Рос. Федерация. Способ получения супертвердого керамического порошкового материала AlMgB<sub>14</sub> / О.К. Лепачова, Б.Ш. Браверман, Н.И. Афанасьев и др. № 2018138211 ; заявл. 29.10.2018 ; опублик. 12.08.2019, Бюл. № 23. 9 с.
17. Супертвердый керамический порошковый материал алюмомагнийевый борид AlMgB<sub>14</sub> («скользящая керамика») // ТНЦ СО РАН : сайт. URL: <http://www.tsc.ru/ru/razrabotki/ceramic.html> (Дата обращения 28.09.2023).
18. Иванов В.А. Математическое моделирование упруго-гидродинамического взаимодействия тел в узлах трения : дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2018. 138 с.
19. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика (в 10 т). Т. 7. Теория упругости. М. : Наука, 1987. 248 с.
20. Hamrock B.J., Schmid S.R., Jacobson B.O. Fundamentals of fluid film lubrication. New York, Basel : Marcel Dekker,

Inc., 2004. 703 p.

21. Автоматическое формирование сетки треугольных элементов для произвольных плоских областей / А.С. Цыбенко, Н.Г. Ващенко, Н.Г. Кришук и др. // Проблемы прочности. 1980. № 12. С. 84–87.

22. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.

## References

1. Kaletin S.V., Goncharov S.G., Konetskii A.K. Perekhod na kassetu: v poiskakh optimal'nogo resheniya [Switching to cassette: in search of an optimal solution]. *Vestnik instituta problem estestvennykh monopolii: tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute of Problems of Natural Monopolies: railway engineering], 2019, no. 4 (48), pp. 6–9.

2. Tyun'kov V.V., Buzunova V.S., Pashkov A.E. Tekhnologicheskii algoritm v perspektivnom konstruktivnom razvitii zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov kolei 1520 mm [Technological algorithm in the future constructive development of 1520 mm gauge railway freight wagons]. [Electronic resource]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no. 4 (10), pp. 18–26.

3. Wang P.F., Togai M. Analiz nechetkoi chuvstvitel'nosti i metod sinteza [Fuzzy sensitivity analysis and synthesis method]. *Sbornik statei «Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostei. Poslednie dostizheniya»* [Fuzzy set and possibility theory. Recent Developments]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1986, pp. 377–390.

4. Galakhov M.A., Gusyatinikov P.B., Novikov A.P. Matematicheskie modeli kontaktnoi gidrodinamiki [Mathematical models of contact hydrodynamics]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 294 p.

5. Zadorozhnaya E.A., Karavaev V.G. Otsenka teplovogo sostoyaniya slozhnonagruzhennogo podshipnika s uchetom reologicheskikh svoystv smazochnogo materiala [Assessment of the thermal state of a heavily loaded bearing taking into account the rheological properties of the lubricant]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Internal combustion engines], 2012, no. 2, pp. 66–73.

6. Braun E.D., Buyanovskii I.A., Voronin N.A., Gurskii B.E., Drozdov Yu.N., Zakharov S.M., Kan S.G., Levchenko V.A., Orlov A.V., Pavlov V.G., Petrov V.P., Puchkov V.N., Semenov A.P., Khrushchov M.M. (Jr.), Chichinadze A.V. Sovremennaya tribologiya: itogi i perspektivy [Modern tribology. Results and prospects]. Moscow: LKI Publ., 2008. 480 p.

7. Kapitsa P.L. Gidrodinamicheskaya teoriya smazki pri kachenii [Hydrodynamic theory of lubrication during rolling]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Technical Physics], 1955, vol. 25, no. 4, pp. 747–762.

8. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. ANSYS v rukakh inzhenera [ANSYS in the hands of an engineer]. Moscow: Editorial URSS Publ., 2003. 272 p.

9. Aizikovich S.M., Aleksandrov V.M., Argatov I.I., Babeshko V.A., Babin A.P., Bardzokas D.Ya., Belokon' A.V., Belyankova T.I., Burak V.Yu., Burak I.I., Vatulyan A.O., Vorovich E.I., Glagovskii V.B., Gorshkov A.G., Goryacheva I.G., Grishin S.A., Zelensov V.B., Zernin M.V., Zlatina I.N., Zlatin A.N., Kadomtsev I.G., Kalinchuk V.V., Kovalenko B.V., Kravchuk A.S., Manevich L.I., Manzhairov A.V., Morozov E.M., Morozov N.F., Nazarov S.A., Nasedkin A.V., Nikishin B.C., Nuller B.M., Pavlik G.N., Panovko M.Ya., Petrov Yu.V., Pozharskii D.A., Pryakhina O.D., Seleznev M.G., Senik N.A., Simonov I.V., Smirnov V.I., Soldatenkov I.A., Sumbatyan M.A., Tarlakovskii D.V., Tukodova O.M., Filippova L.M., Chebakov M.I., Chekina O.G., Shmatkova A.A. Mekhanika kontaktnykh vzaimodeystvii [Mechanics of contact interactions]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2001. 670 p.

10. Denasciutti D., Gallina M., Munteanu M. Gh., Flumian F. A numerical approach for the analysis of deformable journal bearings. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2012, vol. 21, pp. 37–45.

11. Chigaev A.V., Kraychuk A.S., Smalyuk A.F. ANSYS dlya inzhenerov [ANSYS for Engineers]. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ., 2004. 511 p.

12. Bair S.S. High-Pressure Rheology for quantitative elastohydrodynamics. Amsterdam: Elsevier, 2007. 250 p.

13. Bissett E.J., Spence D.A. The Line Contact Problem of Elastohydrodynamic Lubrication. II: Numerical Solutions of the Integrodifferential Equations in the Transition and Exit Layers. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1989, vol. 424, no. 1867, pp. 409–429.

14. Fortier A.E. Numerical Simulation of Hydrodynamic Bearings with Engineered Slip/No-Slip Surfaces. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2004. 90 p.

15. Fortier A. E. Numerical Simulation of a Slider Bearing with an Engineered Slip/No-Slip Surface and Lubrication Engineering. *14th International Colloquium Tribology. Esslingen am Neckar*, 2004, pp. 1699–1704.

16. Lepakova O.K., Braverman B.Sh., Afanas'ev N.I., Golobokov N.N. Patent RU 2697146 C1, 12.08.2019.

17. Supertverdyi keramicheskii poroshkovyi material alyumomagnievyy borid AlMgB<sub>14</sub> («skol'zкая keramika») (elektronnyi resurs) [Superhard ceramic powder material – aluminum-magnesium boride AlMgB<sub>14</sub> («slippery ceramics») (Electronic resource)]. Available at: <http://www.tsc.ru/ru/razrabotki/ceramic.html> (Accessed September 28, 2023).

18. Ivanov V.A. Matematicheskoe modelirovanie uprugo-gidrodinamicheskogo vzaimodeystviya tel v uzlakh treniya [Mathematical modeling of elastic-hydrodynamic interaction of bodies in friction nodes]. Ph.D.'s thesis. Krasnoyarsk, 2018. 138 p.

19. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaya fizika (v 10 t.). T. 7. Teoriya uprugosti [Theoretical physics (in 10 vol.). Vol. 7. Theory of elasticity]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 248 p.

20. Hamrock B.J., Schmid S.R., Jacobson B.O. Fundamentals of fluid film lubrication. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc., 2004. 703 p.

21. Tsybenko A.S., Vashchenko N.G., Krishchuk N.G., Kulakovskii V.N. Avtomaticheskoe formirovanie setki treugol'nykh elementov dlya proizvol'nykh ploskikh oblastei [Automatic generation of a mesh of triangular elements for arbitrary flat areas]. *Problemy prochnosti* [Problems of strength], 1980, no. 12, pp. 84–87.

22. Zienkiewicz O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [The finite element method in engineering science]. Moscow: Mir Publ., 1975. 541 p.

**Информация об авторах**

**Тюньков Владислав Владимирович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: tunkov@bk.ru.

**Воронова Юлия Владиславовна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: voronova\_yuv@irgups.ru.

**Мартыненко Любовь Викторовна**, старший преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru.

**Болдбаатар Солонго**, кафедра вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: boldbaatar\_solongo@irgups.ru.

**Information about the authors**

**Vladislav V. Tyun'kov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: tunkov@bk.ru.

**Yuliya V. Voronova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: voronova\_yuv@irgups.ru.

**Lyubov' V. Martynenko**, Assistant Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru.

**Solongo Boldbaatar**, the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: boldbaatar\_solongo@irgups.ru.

## Построение цифровых двойников железнодорожного пути с помощью мобильных средств диагностики

Т.Н. Асалханова✉, А.М. Давтян

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

✉asalk-tatyana@yandex.ru

### Резюме

В соответствии с государственной программой Российской Федерации «Национальная система пространственных данных», утвержденной постановлением Правительства РФ от 1 декабря 2021 г. № 2148 с целью реализации стратегических направлений развития инновационных технико-технологических решений по использованию пространственных данных и координатных методов управления в производственной деятельности ОАО «РЖД», принята стратегия по цифровой трансформации компании до 2025 г. Стратегия нацелена на эффективное функционирование, модернизацию и инновационное развитие железнодорожного транспорта. Одно из направлений развития в области цифровой трансформации – это моделирование объектов путевой инфраструктуры в режиме реального времени, т.е. построение цифровых моделей железнодорожного пути на основе данных, полученных с мобильных средств диагностики. В статье представлены результаты изучения нормативных документов по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами, методы расшифровки путеизмерительных лент, типы путеизмерителей, контролируемые параметры железнодорожного пути, а также подходы к имитационному моделированию реальных объектов путевой инфраструктуры с помощью внедряемых инновационных технологий диагностики и мониторинга, прогнозирования поведения элементов железнодорожного пути при различных нагрузках в автоматизированной системе управления инфраструктурой. Кроме того, рассмотрен математический аппарат, применяемый для прогнозирования состояния рельсовой колеи по показаниям диагностических комплексов путеизмерителей. Использование современных технологий, внедряемых с помощью мобильных средств диагностики, позволяет решить такие задачи, как совершенствование контроля за содержанием железнодорожного пути, обеспечение комплексной его диагностики, анализ параметров и прогнозирование состояния элементов верхнего строения пути, своевременное устранение выявленных отступлений и неисправностей геометрии рельсовой колеи в режиме параллельной расшифровки, снижение повторов пропусков дефектов, повышение безопасности движения подвижного состава.

### Ключевые слова

мобильные средства диагностики, железнодорожный путь, путеизмерительно-диагностический комплекс, цифровой двойник

### Для цитирования

Асалханова Т.Н. Построение цифровых двойников железнодорожного пути с помощью мобильных средств диагностики / Т.Н. Асалханова, А.М. Давтян // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 54–64. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).54-64.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 26.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 24.11.2023 г.; принята к публикации: 27.11.2023 г.

## Construction of railway track digital twins using mobile diagnostic tools

T.N. Asalkhanova✉, A.M. Davtyan

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

✉asalk-tatyana@yandex.ru

### Abstract

In accordance with the state program of the Russian Federation «National Spatial Data System», which was approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No 2148 dated December 1, 2021 and in order to implement strategic directions for the development of innovative technical and technological solutions for the use of spatial data and coordinate management methods in the production activities of JSC «Russian Railways», a strategy for the digital transformation of the company until 2025 was adopted. The strategy is aimed at the effective functioning, modernization and innovative development of railway transport. One of the directions of development in the field of digital transformation is the modeling of the railway infrastructure objects in real time, i.e. the construction of digital models of the railway track based on data obtained from mobile diagnostic tools. The article presents the results of the study of normative documents on the assessment of the state of the track gauge by track measuring means, methods of decoding track measuring tapes, types of track measuring devices and controlled railway track parameters, as well as approaches to simulation modeling of real objects of track infrastructure using innovative diagnostics and monitoring technologies and forecasting the behavior of elements of the railway track under various loads in an automated

system infrastructure management. A mathematical apparatus is also considered, which is used to predict the state of the track gauge according to the indications of the diagnostic complexes of the track measuring devices. The use of modern technologies implemented by means of mobile diagnostic tools allows to solve such tasks as improving control over the maintenance of the railway track, providing comprehensive diagnostics of its condition, analyzing parameters and predicting the state of the elements of the track's upper structure, timely elimination of identified deviations and malfunctions of the rail track geometry in parallel decoding mode, reducing the number of omitted defects and improving the safety of rolling stock traffic.

### Keywords

mobile diagnostic tools, railway track, track measuring and diagnostic complex, digital twin

### For citation

Asalkhanova T.N., Davtyan A.M. Postroenie tsifrovyykh dvoynikov zheleznodorozhnogo puti s pomoshch'yu mobil'nykh sredstv diagnostiki [Construction of railway track digital twins using mobile diagnostic tools]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 54–64. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).54-64.

### Article Info

Received: October 26, 2023; Revised: November 24, 2023; Accepted: November 27, 2023.

### Введение

В Долгосрочной программе развития холдинга ОАО «РЖД» ключевыми инициативами в области инфраструктуры определены подготовка ее объектов для обеспечения пропуски тяжелых поездов, установление гарантийных участков безопасного проследования грузовых поездов увеличенной протяженности, формирование полигонной модели работы путевых машин и диагностических комплексов [1]. Для этих целей в холдинге началось внедрение цифровых технологий и имитационного моделирования железнодорожного пути [2, 3].

Железнодорожный путь относится к инфраструктуре путевого хозяйства холдинга, в которую входят верхнее строение пути, земляное полотно, искусственные сооружения.

Рельсовая колея является одним из элементов верхнего строения пути и объектом, непосредственно взаимодействующим с подвижным составом. От ее технического состояния напрямую зависит безопасность движения поездов с установленными скоростями и затраты на текущее содержание и ремонтно-путевые работы. Неисправности рельсовой колеи могут быть вызваны не только отказами элементов ее конструкции, но и неисправностями земляного полотна и искусственных сооружений [4]. Поэтому диагностике и мониторингу железнодорожного пути уделяется огромное внимание, так как данные, полученные с измерительных средств, позволяют смоделировать реальный объект с учетом фактического воздействия со стороны различных сил и факторов с использованием высокоточных методов координатно-временного обеспечения [5].

Техническое обслуживание и ремонт путевой инфраструктуры выполняется по регламенту с периодичностью, утвержденной в нормативных документах ОАО «РЖД», но такой подход имеет ряд ограничений, связанных с невозможностью максимально и равномерно использовать ресурсы конструкции объектов инфраструктуры, а также выявлять риски возникновения или повторов отказов технических средств. Таким образом, существует потребность в комплексном цифровом инструменте, который помог бы эффективно планировать и организовывать процесс технического обслуживания и ремонта путевой инфраструктуры в зависимости от реального состояния конструкций и объектов, в том числе с возможностью применения инструментов имитационного моделирования [6].

Целью данной статьи является определение подходов к построению цифрового двойника (ЦД) железнодорожного пути. Одним из возможных инструментов в решении этого вопроса могут быть современные технологии, используемые в настоящее время в средствах диагностики и мониторинга.

### Анализ средств диагностики и мониторинга объектов путевой инфраструктуры на Восточно-Сибирской железной дороге

Под ЦД понимается система, которая состоит из цифровой модели элемента железнодорожного пути с построением двусторонних информационных связей с другими составными частями объектов путевой инфраструктуры. ЦД должен разрабатываться и применяться на всех



стадиях жизненного цикла объектов инфраструктуры [5, 7].

В соответствии с нормативными документами холдинга ОАО «РЖД» в путевом хозяйстве действует многоуровневая система диагностики и контроля (мониторинга) железнодорожного пути, включающая в себя следующие мероприятия:

- комиссионные осмотры объектов железнодорожного пути, организуемые руководителями различного уровня;

- периодические натурные измерения объектов железнодорожного пути с использованием ручных средств измерения (путевых шаблонов, ручных тележек, линеек, рулеток и др.);

- периодические диагностические исследования объектов пути под реальной нагрузкой с использованием вагонов-лабораторий (путеизмерительных, дефектоскопных), оснащенных диагностическими комплексами «Интеграл», «Эра» [8, 10, 11].

В настоящее время в Иркутском региональном центре диагностики и мониторинга (РЦДМ) эксплуатируются несколько диагностических комплексов, которые позволяют построить ЦД на основе реальных данных. Одним из таких комплексов является самоходный универсальный путеизмерительно-диагностический комплекс (СУПДК) «Север».

К основным функциям данного комплекса относятся:

- контроль геометрических параметров рельсовой колеи;

- оценка в баллах состояния пути по геометрическим параметрам;

- обработка дополнительных параметров (скорость, расстояние, время);

- обработка параметров привязки к исследуемому участку пути (координат километровых столбов, переездов, стрелочных переводов);

- документирование сверхоперативной информации об обнаруженных местах пути с грубыми и опасными отступлениями с одновременной выдачей звукового и светового сигнала, индикацией на мониторе;

- документирование оперативной информации в объеме, достаточном для принятия мер по обеспечению безопасности движения поездов, а также для планирования путевых работ текущего содержания пути;

- ультразвуковая и магнитная дефектоскопия;

- лазерное трехмерное сканирование;

- георадиолокационная диагностика;

- документирование нормативно-отчетной информации в пределах границ административного деления дистанции [12].



Рис. 1. Самоходный универсальный путеизмерительно-диагностический комплекс «Север»

Fig. 1. Self-propelled universal track measuring and diagnostic complex «North»

### Самоходный универсальный путеизмерительно-диагностический комплекс «Север»

Комплекс «Север» специально разработан не только для работы в южных и центральных регионах нашей страны, но и в условиях Крайнего Севера. СУПДК может одновременно осуществлять на ходу как диагностирование рельсового хозяйства, так и контроль геометрических параметров колеи главных и приемоотправочных путей. Еще одно предназначение самоходного комплекса – это доставка работников дистанций пути к месту работ.

СУПДК имеет длину 23,5 м, что в 2 раза больше других комплексов и является более комфортабельным для специалистов РЦДМ. Помимо двух кабин машинистов и рабочего салона в нем имеется все, что необходимо для отдыха персонала: три жилых купе, кухня-

столовая, душ с горячей водой (рис. 1) [12].

В аппаратной, разделенной прозрачной перегородкой на две части, установлены два аппаратно-программных комплекса, столы и сиденья для сопровождающих, зона оперативного контроля (перед задними окнами), организационно-техническое автоматизированное рабочее место (ОТ АРМ) в зоне аналитической обработки, аудио- и видеосистемы, позволяющие визуально наблюдать поверхности головки рельсов и колесной пары на мониторах. Видео-запись выполняется с привязкой к записи параметров измерения, поэтому может быть организован просмотр локальных мест отступлений при анализе данных измерений. В мастерской установлены шкафы для рабочей пневматической системы, системы электроснабжения (СЭС), зарядного устройства, блоков радио-

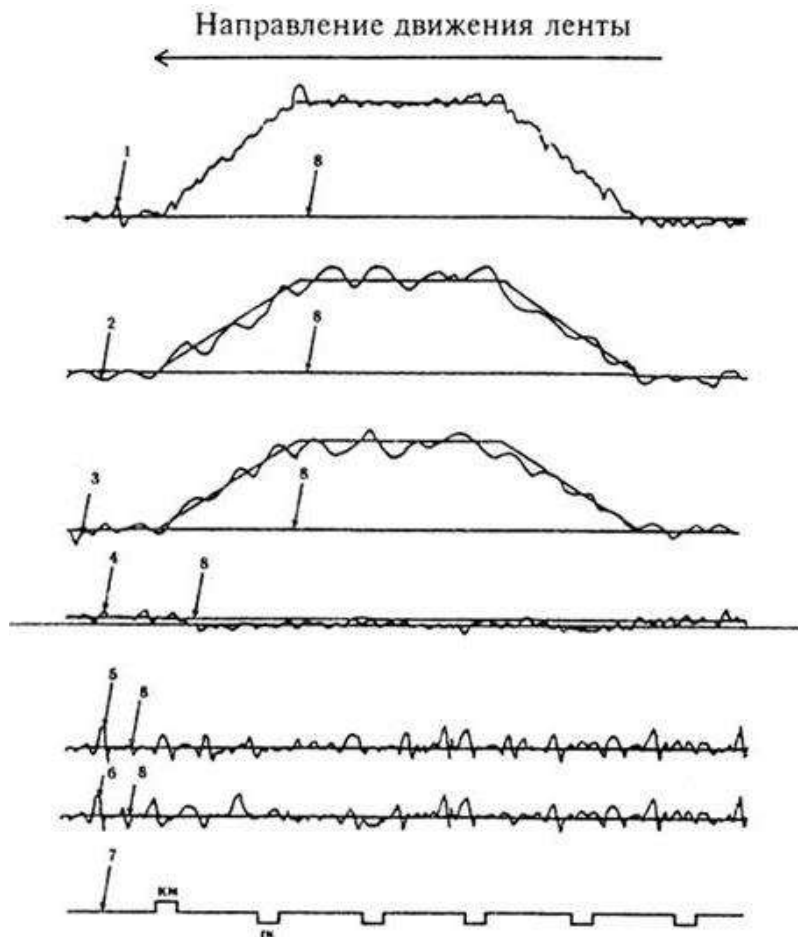


Рис. 2. Образец путеизмерительной ленты с записями:

1 – уровень; 2, 3 – положение в плане правой и левой рельсовых нитей; 4 – ширина колеи; 5, 6 – просадка по правой и левой рельсовым нитям; 7 – расположение пикетов и километров; 8 – нулевые линии

Fig. 2. A sample of a track measuring tape with entries:

1 – level; 2, 3 – position of the right and left rail threads in the plan; 4 – track width; 5, 6 – drawdown on the right and left rail threads; 7 – location of pickets and kilometers; 8 – zero lines

станции, одежды, запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП), а также верстак для выполнения некоторых ремонтных работ. Для удобства наблюдения и технического обслуживания большинство измерительных механизмов с датчиками расположены снизу кузова вагона.

На путеизмерительных вагонах, оборудованных бортовыми автоматизированными системами (БАС), контролируемые параметры рельсовой колеи записываются на путеизмерительную ленту в масштабе: продольный – 1:2 000; уровень – 1:2; просадки – 1:1; ширина колеи – 1:1; отклонения рельсовых нитей в плане – 1:2. Образец путеизмерительной ленты представлен на рис. 2.

### Построение цифрового двойника железнодорожного пути на основании путеизмерительных лент с помощью диагностических комплексов

В нашей стране и холдинге ОАО «РЖД» приняты руководящие документы, которые позволяют стандартизировать процессы имитационного моделирования ЦД [13–15]. Принятый в компании подход к построению ЦД определяет четыре основных блока для их создания – статичные объекты (например, верхнее строение пути), динамичные (например, локомотивы), процессы (например, управленческие) и параметры внешней среды. Наличие этих элементов, дополненных алгоритмами пересчета показателей,

позволит моделировать различные сценарии и прогнозировать будущее состояние железнодорожного пути и объектов инфраструктуры. Так, с помощью представления ЦД путевой инфраструктуры можно выявить аномалии в процессах технического обслуживания и достичь различных функциональных целей, таких как управление в режиме реального времени, аналитика в автономном режиме, проверка работоспособности, предиктивное обслуживание, синхронизированный мониторинг/оповещения, анализ больших данных, машинное обучение и т.д. [13].

Для формирования ЦД объектов железнодорожной инфраструктуры широко используются данные от диагностических комплексов (ДКИ) «Интеграл» и «Эра». Согласно распоряжению ОАО «РЖД» «Инструкция по оценке состояния инфраструктуры с использованием новых диагностических средств комплексной диагностики инфраструктуры ОАО «РЖД» от 5 декабря 2011 г. № 2615р, диагностические комплексы «Эра» и «Интеграл» являются средствами комплексной диагностики и мониторинга сетевого и дорожного уровня параметров фактического состояния объектов железнодорожной инфраструктуры, включая объекты хозяйств пути, энергетики и электроснабжения, железнодорожной автоматики и телемеханики. Такие диагностические программные комплексы предназначены для одновременного контроля более 100 характеристик фактического состояния объектов инфраструктуры, которые

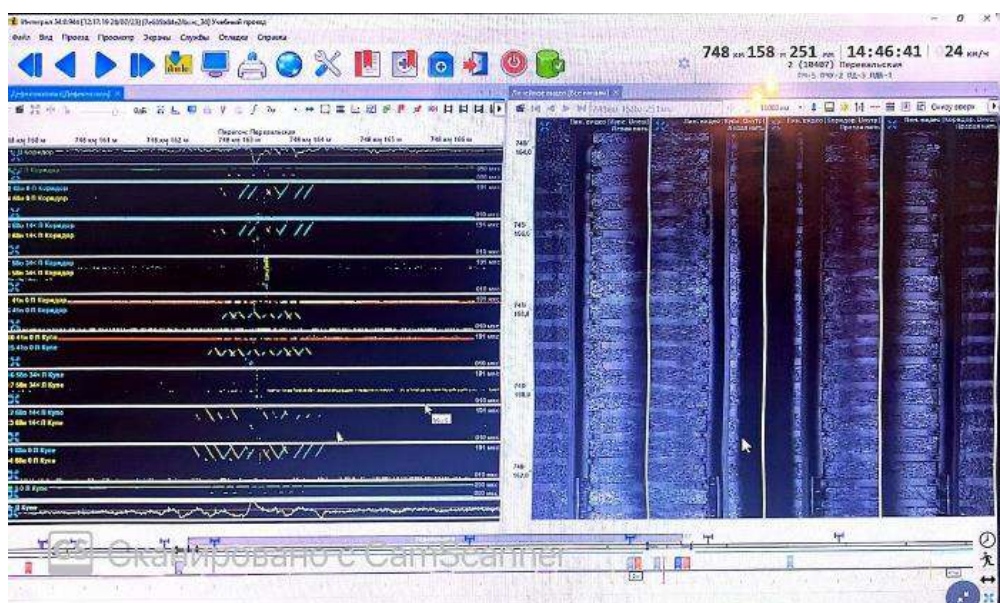


Рис. 3. Измерительная информация диагностического комплекса инфраструктуры «Интеграл»  
Fig. 3. Measurement information of the diagnostic infrastructure complex «Integral»

ранее проверялись вручную или узкоспециализированными диагностическими средствами разных служб ОАО «РЖД».

Измерительная информация для дальнейшего анализа, оценки и прогнозирования технического состояния железнодорожного пути и его элементов от ДКИ «Интеграл» представлена на рис. 3.

На основании данных, полученных с ДКИ, строятся 3D-модели объектов железнодорожной инфраструктуры. Например, стрелочный перевод с указанием отклонений от норм содержания по некоторым параметрам: критическое расстояние в крестовине, ширина колеи, взаимное расположение остряков и рамных рельсов (рис. 4).

С учетом изложенного, имитационное моделирование и построение 3D-моделей является необходимой и эффективной технологией для анализа состояния железнодорожного пути, оценки жизненного цикла элементов путевого хозяйства, прогнозирования возможностей появления неисправностей пути. Но для повышения эффективности работы имитационного моделирования пути все равно необходимо рассчитать прогнозные значения, чтобы спланировать и устранить потенциально опасные неисправности на основе полученных значений и закономерностей прогнозирования [16].

#### Математический процесс прогнозирования состояния рельсовой колеи по показаниям вагона путеизмерителя

На примере СУПДК «Север» рассмотрим математический аппарат прогнозирования со-

стояния рельсовой колеи. Благодаря установленным системам измерения параметров пути, ультразвуковой и магнитной дефектоскопии, лазерного трехмерного сканирования и визуального контроля можно получать достоверную картину путевой инфраструктуры. С помощью оборудования записывается состояние рельсовой колеи как непрерывный случайный процесс в пространстве, оценивая состояние участка пути в виде комплексного показателя в диагностическом программном обеспечении «Интеграл», в частности балльной оценки превышений амплитуд неровностей рельсовой колеи, определенных допусками содержания железнодорожного пути по нормативным документам [6].

По результатам прохода по участку  $L$  путеизмерительный вагон выдает некоторую интегральную оценку участка пути  $B$  (балльная оценка участка или количество отступлений на участке, или скользящее среднее). За  $N$  проходов вагона путеизмерителя по выбранному участку пути совокупность этих оценок  $B_i$  можно представить как выборочную реализацию временного ряда  $B(N)$  от  $N$  проходов вагона путеизмерителя:

$$B(N) = M + \zeta,$$

где  $M$  – модель процесса изменения состояния пути на участке во времени (от пропущенного тоннажа);  $\zeta$  – характеризует влияние различных факторов (погрешность средств диагностики, установленных на вагоне, ошибки оператора и т.п.) и генерируется случайным неавтокоррелированным процессом с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией случайных возмущений.

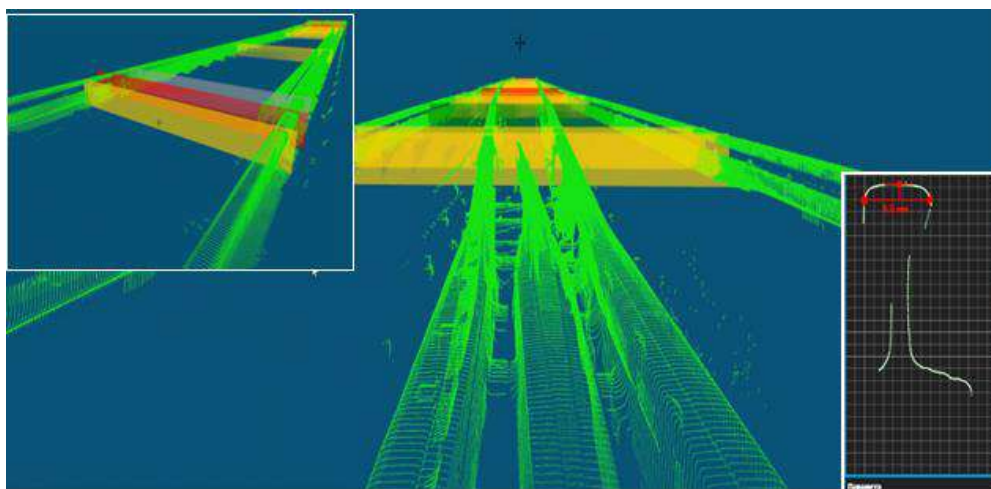


Рис. 4. 3D-модель стрелочного перевода с обозначением отклонений от норм содержания  
 Fig. 4. 3D model of the switch with the designation of deviations from the content standards

Для учета влияния работ по техническому обслуживанию железнодорожного пути между проходами вагона путеизмерителя в математической модели определено, что коэффициенты модели должны приспосабливаться к непрерывно меняющимся условиям эксплуатации железнодорожного пути.

Для анализа законов распределения случайных величин и их числовых характеристик применительно к оценке состояния железнодорожного пути используются бета-распределение  $B$ , гамма-распределение  $G$  и распределения Гумбеля для минимальных значений –  $G_{\min}$ .

Физико-вероятностное обоснование использования распределения случайной величины при анализе надежности железнодорожного пути и путевых машин, механизмов, подвижного состава для технического обслуживания железнодорожного пути представлено в таблице [9, 10, 17].

Исходя из этого, моделирование процесса прогнозирования появления дефектов железнодорожного пути можно принять как бета-распределение  $B$ , и как частный случай нормального распределения; гамма-распределения  $G$ ; но наиболее эффективным будет применение распределения Гумбеля для минимальных значений  $G_{\min}$ .

### Использование единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой (система диагностики и мониторинга инфраструктуры)

В соответствии с нормативными документами ОАО «РЖД» продолжается инновационное развитие системы диагностики и мониторинга физических активов холдинга, регламентированы правила оценки состояния инфраструктуры при обследовании железнодорожного пути и комплексной оценки технического состояния с помощью мобильных средств диа-

Физико-вероятностное обоснование использования случайной величины  
Physical and probabilistic justification of the use of a random variable

Распределение	Рекомендуемое распределение	Рекомендуемое применение
	Физико-вероятностная модель	Применение для ж/д пути
Гамма-распределение $G$ Gamma-distribution $G$	Наработка до пересечения допустимого уровня компактным случайным процессом с сильным перемешиванием, с монотонными реализациями и с линейным законом изменения математического ожидания Operating time until the admissible level is crossed by a compact random process with strong mixing, with monotonic implementations and with a linear law of change in the mathematical expectation	Распределение времени, необходимого для появления ( $b$ ) событий с постоянной интенсивностью $\lambda$ . Пример, наработка до предельно допустимого износа, зависящего от условий эксплуатации в кривых, величина зазоров в рельсовых стыках и т.д. Distribution of the time required for the occurrence of ( $b$ ) events with constant intensity $\lambda$ . Example, operating time up to the maximum permissible wear, depending on operating conditions in curves, the size of gaps in rail joints, etc.
Бета-распределение $B$ Beta-distribution $B$	Случайная величина, зависящая от большого числа случайных малосущественных факторов при наличии нескольких существенных факторов, распределена примерно по бета закону A random variable, depending on a large number of random unimportant factors in the presence of several significant factors, distributed approximately according to the beta law	Оценка доли выявленных дефектных элементов верхнего строения пути (рельсов, шпал, креплений и т.д.) в единицу времени. Время технического обслуживания на ремонтном предприятии Estimation of the proportion of identified defective elements of the upper track structure (rails, sleepers, fastenings, etc.) per unit of time. Maintenance time at a repair facility.
Гумбеля $G$ для минимальных значений, $G_{\min}$ Gumbel $G$ for minimum values, $G_{\min}$	Распределение значения независимых случайных величин, имеющих вид экспоненты Distribution of the value of independent random variables having the form of an exponent	Независимые случайные величины длительности безотказной работы отдельных элементов распределены по нормальному закону Independent random variables of the duration of failure-free operation of individual elements distributed according to the normal law

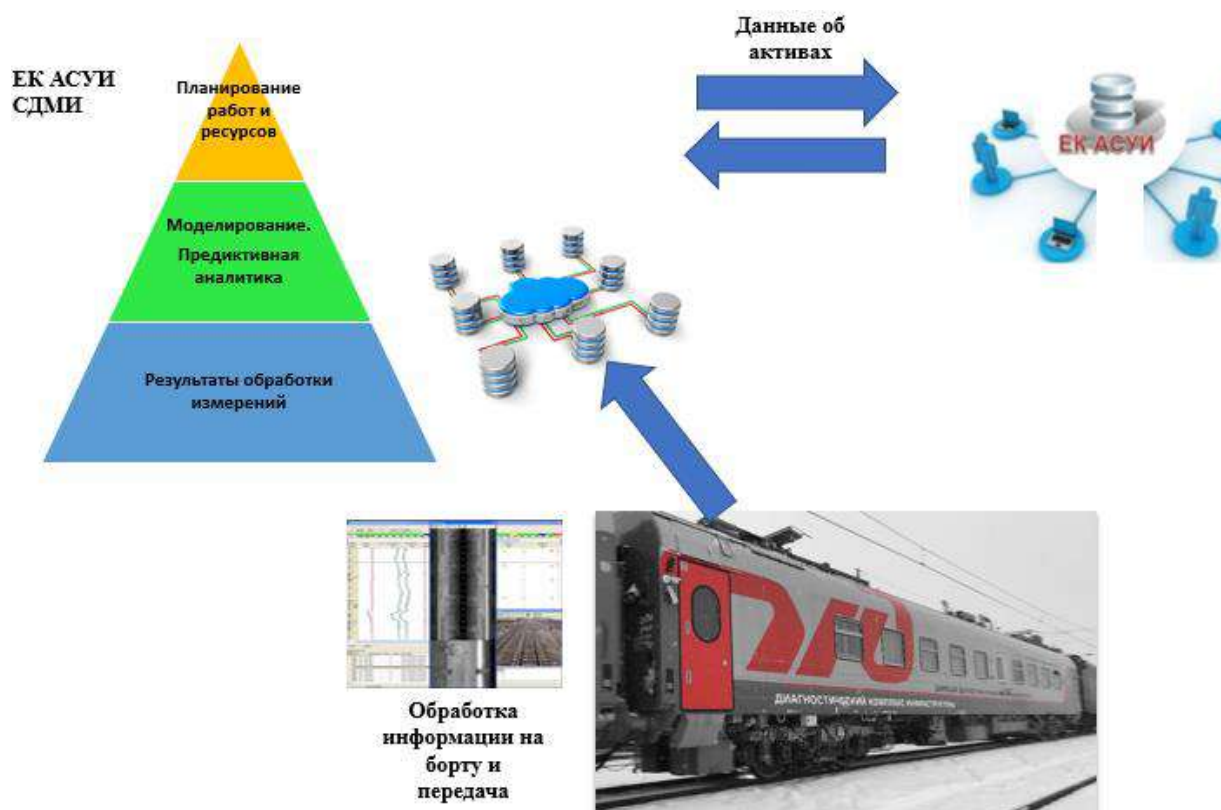
гностики (МСД) на базе ДКИ, специализированных МСД состояния объектов хозяйств пути и сооружений (съёмные дефектоскопные тележки, электронные путевые шаблоны, беспилотные летательные аппараты), которые являются основными источниками информации для контроля объектов железнодорожной инфраструктуры в целом. Данные средства позволяют обеспечить привязку исследуемых объектов к железнодорожной путевой и геодезической системе координат (ГЛОНАСС/GPS), а также производить одновременный контроль параметров: геометрии рельсовой колеи (ГРК) – основные параметры, положение пути в плане и продольном профиле, длинные неровности, а также параметров рельсов (короткие неровности, стыковые зазоры, фактические профили головок рельсов, наклон поверхности катания, подуклонка, износы головок рельсов, намагниченность рельсов); верхнего строения пути и земляного полотна (параметры очертания балластной призмы и земляного полотна, георадиозондирование, выявление нестабильных участков балластной призмы и земляного полотна, рельсошпальной

решетки); габаритов приближения строений, мостов, туннелей и величины междупутного расстояния [18–20].

Информация с путеизмерительных средств в режиме онлайн передается в единую корпоративную автоматизированную систему управления инфраструктурой (система диагностики и мониторинга инфраструктуры) (ЕК АСУИ СДМИ) – информационно-аналитическую систему комплексной диагностики и мониторинга железнодорожной инфраструктуры. Система предназначена для анализа и прогнозирования состояния объектов инфраструктуры. Внедрение сквозных цифровых технологий и нейросетей в ЕК АСУИ СДМИ позволяют сформировать цифровую платформу для построения имитационных моделей объектов инфраструктуры [21].

Архитектура ЕК АСУИ СДМИ и интеграционные процессы с системным комплексом ЕК АСУИ показаны на рис. 5.

Результаты обработки информации, которые получают на борту ДКИ, передаются в систему ЕК АСУИ СДМИ, далее в системе



**Рис. 5.** Функциональная архитектура единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой (система диагностики и мониторинга инфраструктуры)

**Fig. 5.** Functional architecture of the unified corporate automated infrastructure management system (infrastructure diagnostics and monitoring system)

производится моделирование элементов пути и 3D-модель может быть применена при прогнозе эксплуатационного ресурса объектов инфраструктуры, планировании текущего содержания пути и ремонтов, функционировании систем мониторинга.

### Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что построение цифровых двойников на основе данных, полученных с путеизмерительных диагностических комплексов, поможет усовершенствовать работу мобильных и съемных средств диагностики, обеспечить своевременное и точное прогнозирование появления дефектов рельса, отступлений от нормативных показателей и других неисправностей, связанных с верхним строением пути, земляным полотном, объектами железнодорожной инфраструктуры и тем самым обеспечить безопасность движения поездов.

Внедрение инновационных технологий значительно помогает в совершенствовании пу-

теизмерительных комплексов, что предполагает увеличение их рабочих скоростей, установку нового современного оборудования, повышение точности измерения параметров и увеличение числа получаемых параметров, оснащение путеизмерительных вагонов аппаратурой автоматизированной обработки, хранения и передачи полученной информации. В перспективе, согласно Концепции развития систем диагностики и мониторинга объектов путевого хозяйства на период до 2025 г., на сети железных дорог вагоны-путеизмерители должны быть оснащены автономной системой диагностики и диагностическими комплексами [5, 19, 20].

До 2030 г. прогнозируется еще больший прогресс в области имитационного моделирования и построения цифровых двойников железнодорожного пути с помощью диагностических путеизмерительных комплексов, беспилотных летальных аппаратов и других средств диагностики железнодорожной инфраструктуры.

### Список литературы

1. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 19.03.2019 № 466 (ред. 13.10.2022). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
2. О реализации стратегии цифровой трансформации ОАО «РЖД» до 2025 года : распоряжение ОАО «РЖД» от 31.07.2020 № 1640/р (ред. 31.03.2021). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
3. Об утверждении дорожной карты научно-технического сопровождения внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства ОАО «РЖД» с использованием технологии информационного моделирования : распоряжение ОАО «РЖД» от 29.01.2020 № 161/р (ред. 11.04.2022). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
4. Об утверждении инструкции по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов : распоряжение ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436/р (ред. 29.06.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
5. Об утверждении концепции внедрения геоинформационных технологий, в том числе высокоточных методов координатно-временного обеспечения, в производственные процессы строительства, эксплуатации, ремонта и диагностики инфраструктуры, организации движения, управления тяговыми ресурсами : распоряжение ОАО «РЖД» от 30.12.2020 г. № 2976/р. Доступ из справ.-правовой системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
6. Об утверждении и введении в действие инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 16.11.2016 № 2288р (ред. 26.05.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
7. Об утверждении положения о порядке верификации программных средств компьютерного моделирования в ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» от 02.06.2023 № 1326/р. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
8. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России № 250 от 23.06.2022. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
9. Общие требования к системе менеджмента безопасности движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении государств - участников Содружества : утв. протоколом Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества от 23.06.2023 № 78. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
10. Об утверждении технических требований к конструкции железнодорожного пути и системе его технического обслуживания, обеспечивающей наработку пропущенного тоннажа 2,5 млрд. тонн брутто : распоряжение ОАО «РЖД» от 13.04.2023 № 931/р. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
11. Об утверждении инструкции по автоматизированному определению, анализу, оценке и использованию в ЕК АСУИ дополнительных параметров устройства и состояния объектов железнодорожного пути, контролируемых диагностическими комплексами ЭРА и ИНТЕГРАЛ : распоряжение ОАО «РЖД» от 31.12.2013 № 3009р (ред. 31.12.2015). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
12. Скоростные и высокоскоростные диагностические комплексы инфраструктуры // Твема : сайт. URL: <https://www.tvema.ru/sites/default/files/pdf/629.pdf> (дата обращения 16.10.2023).

13. Об утверждении временной концепции технологии цифрового двойника инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» от 09.06.2021 № 1281/р. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
14. ГОСТР 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. Введ. 2022–01–01. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 15 с.
15. Зуев Д.В., Бочкарёв С.В. Цифровой двойник инфраструктуры ОАО «РЖД» // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 11. С. 11–14.
16. Суслов О.А., Федорова В.И. Цифровые двойники – перспективная основа планирования технического обслуживания железнодорожного пути // Наука 1520 : загляни за горизонт : материалы I Междунар. науч.-практ. конф. Щербинка, 2021. С. 184–192.
17. Сычев П.В. Совершенствование системы технического обслуживания железнодорожного пути на основе моделирования закономерностей его изменения и автоматизации процессов производства : дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 220 с.
18. Об утверждении правил оценки состояния инфраструктуры ОАО «РЖД» (хозяйств пути и сооружений, железнодорожного электроснабжения и железнодорожной автоматики и телемеханики) : распоряжение ОАО «РЖД» № 159/р от 27.01.2022 (ред. 21.06.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
19. Об утверждении концепции развития и реформирования подходов в области диагностирования и мониторинга физических активов ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» № 1896/р от 22.07.2022. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
20. Об утверждении методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности : распоряжение ОАО «РЖД» № 2706р от 22.12.2017. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
21. Тарабрин В.Ф., Юрченко Е.В., Лохач А.В. ЕК АСУИ СДМИ – цифровая платформа для предиктивного анализа и управления состоянием железнодорожной инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 6. С. 25–28.

### References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 19.03.2019 № 466 (red. 13.10.2022) «Dolgosrochnaya programma razvitiya ОАО «RZHD» do 2025 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation. Federation dated March 19, 2019 No 466 (ed. October 13, 2022) «Long-term development program of JSC «Russian Railways» until 2025»].
2. Rasporyazhenie ОАО «RZHD» ot 31.07.2020 g. № 1640/r «O realizatsii strategii tsifrovoy transformatsii ОАО «RZHD» do 2025 goda» (red. 31.03.2021) [Order of JSC «Russian Railways» dated July 31, 2020 No 1640/r «On the implementation of the Digital Transformation Strategy of JSC «Russian Railways» until 2025» (ed. March 31, 2021)].
3. Rasporyazhenie ОАО «RZHD» ot 29.01.2020 g. № 161/r «Ob utverzhenii dorozhnoi karty nauchno-tekhnicheskogo so-provozhdeniya vnedreniya sistemy upravleniya zhiznennym tsiklom ob'ektov kapital'nogo stroitel'stva ОАО «RZHD» s ispol'zovaniem tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya» (red. 11.04.2022) [Order of JSC «Russian Railways» dated January 29, 2020 No 161/r «On approval of the roadmap of scientific and technical support for the implementation of the life cycle management system of capital construction facilities of JSC «Russian Railways» using information modeling technology» (ed. April 11, 2022)].
4. Rasporyazhenie ОАО «RZHD» ot 28.02.2020 g. № 436/r «Ob utverzhenii instruksii po otsenke sostoyaniya rel'sovoi kolei puteizmeritel'nymi sredstvami i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov» (red. 29.06.2023) [Order of JSC «Russian Railways» dated February 28, 2020 No 436/r «On approval of the instructions for assessing the condition of the track gauge by track measuring means and measures to ensure the safety of train traffic» (ed. June 29, 2023)].
5. Rasporyazhenie ОАО «RZHD» ot 30.12.2020 g. № 2976/r «Ob utverzhenii kontseptsii vnedreniya geoinformatsionnykh tekhnologii, v tom chisle vysokotochnykh metodov koordinatno-vremennogo obespecheniya, v proizvodstvennye protsessy stroitel'stva, ekspluatatsii, remonta i diagnostiki infrastruktury, organizatsii dvizheniya, upravleniya tyagovymi resursami» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 30, 2020 No 2976/r «On approval of the concept of introduction of geoinformation technologies, including high-precision methods of coordinate-time support, in the production processes of construction, operation, repair and diagnostics of infrastructure, traffic management, traction resources management»].
6. Rasporyazhenie ОАО «RZHD» ot 14.11.2016 g. № 2288r (red. 26.05.2023) «Ob utverzhenii i vvedenii v deistvie instruksii po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti» [Order of JSC «Russian Railways» dated November 14, 2016 No 2288r «On the approval and implementation of the instructions for the current maintenance of the railway track» (ed. May 26, 2023)].
7. Rasporyazhenie ОАО «RZHD» ot 02.06.2023 g. № 1326/r «Ob utverzhenii polozheniya o poryadke verifikatsii programnykh sredstv komp'yuternogo modelirovaniya v ОАО «RZHD» [Order of JSC «Russian Railways» dated June 2, 2023 No 1326/r «About the approval of the regulation on the procedure for verification of computer modeling software in JSC «Russian Railways»].
8. Priказ Mintransa Rossii № 250 ot 23.06.2022 «Ob utverzhenii Pravil tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No 250 dated June 23, 2022 «On approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation»].
9. Obshchie trebovaniya k sisteme menedzhmenta bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte v mezhdunarodnom soobshchenii gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva: utv. protokolom Soveta po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva ot 23.06.2023 № 78 [General requirements for the railway traffic safety management system in international traffic of the Commonwealth Member States : approved by the Protocol of the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States dated 23.06.2023 No 78].
10. Rasporyazhenie ОАО «RZHD» ot 13.04.2023 № 931/r «Ob utverzhenii tekhnicheskikh trebovaniy k konstruksii zheleznodorozhnogo puti i sisteme ego tekhnicheskogo obsluzhivaniya, obespechivayushchei narabotku propushchennogo ton-nazha 2,5 mlrd. tonn brutto» [Order of JSC «Russian Railways» dated April 13, 2023 No 931/r «On the approval of technical



requirements for the construction of the railway track and its maintenance system, ensuring the operating time of the missed tonnage of 2,5 billion gross tons»].

11. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 31.12.2013 g. № 3009r «Ob utverzhdenii instruktsii po avtomatizirovannomu opredeleniyu, analizu, otsenke i ispol'zovaniyu v EK ASUI dopolnitel'nykh parametrov ustroistva i sostoyaniya ob'ektov zheleznodorozhnogo puti, kontroliruemyykh diagnosticheskimi kompleksami ERA i INTEGRAL» (red. 31.12.2015) [Order of JSC «Russian Railways» dated December 31, 2013 No 3009r «On approval of the instructions for automated determination, analysis, evaluation and use in the unified corporate automated infrastructure management system of additional parameters of the device and condition of railway track facilities controlled by ERA and INTEGRAL diagnostic complexes» (ed. December 31, 2015)].

12. Skorostnye i vysokoskorostnye diagnosticheskie komplekсы инфраструктуры (Elektronnyi resurs) [High-speed and high-speed diagnostic infrastructure complexes (Electronic resource)]. Available at: <https://www.tvema.ru/sites/default/files/pdf/629.pdf> (Accessed October 16, 2023).

13. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 09.06.2021 № 1281/r «Ob utverzhdenii vremennoi kontseptsii tekhnologii tsifrovogo dvoynika infrastruktornogo kompleksa OAO «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» dated June 9, 2021 No 1281/r «On the approval of the temporary concept of the digital twin technology of the infrastructure complex of JSC «Russian Railways»].

14. GOSTR 57700.37-2021 Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoyniki izdelii. Obshchie polozheniya [State Standard R 57700.37-2021 Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 15 p.

15. Zuev D.V., Bochkarev S.V. Tsifrovoy dvoynik infrastruktury OAO «RZhD» [Digital twin of the infrastructure of JSC «Russian Railways»]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics], 2020, no. 11, pp. 11–14.

16. Suslov O.A., Fedorova V.I. Tsifrovye dvoyniki – perspektivnaya osnova planirovaniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya zheleznodorozhnogo puti [Digital doubles – a promising basis for planning maintenance of a railway track]. *Materialy I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka 1520: zaglyani za gorizont»* [Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference «Nauka 1520: look beyond the horizon»]. Shcherbinka, 2021, pp. 184–192.

17. Sychev P.V. Sovershenstvovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya zheleznodorozhnogo puti na osnove modelirovaniya zakonornostei ego izmeneniya i avtomatizatsii protsessov proizvodstva [Improvement of the railway track maintenance system based on modeling patterns of its change and automation of production processes]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2020. 220 p.

18. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 159/r ot 27.01.2022 «Ob utverzhdenii pravil otsenki sostoyaniya infrastruktury OAO «RZhD» (khozyaistv puti i sooruzhenii, zheleznodorozhnogo elektrosnabzheniya i zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki)» (red. 21.06.2023) [Order of JSC «Russian Railways» No 159/r dated January 27, 2022 «On approval of the rules for assessing the state of the infrastructure of JSC «Russian Railways» (track farms and structures, railway power supply and railway automation and telemechanics)» (ed. June 21, 2023)].

19. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 1896/r ot 22.07.2022 «Ob utverzhdenii kontseptsii razvitiya i reformirovaniya podkhodov v oblasti diagnostirovaniya i monitoringa fizicheskikh aktivov OAO «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» No 1896/r dated July 22, 2022 «On approval of the concept of development and reform of approaches in the field of diagnostics and monitoring of physical assets of JSC «Russian Railways»].

20. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 2706r ot 22.12.2017 «Ob utverzhdenii metodiki otsenki vozdeistviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti» [Order of JSC «Russian Railways» No 2706r dated December 22, 2017 «On approval of the methodology for assessing the impact of rolling stock on the track under the conditions of ensuring reliability»].

21. Tarabrin V.F., Yurchenko E.V., Lkhach A.V. EK ASUI SDMI – tsifrovaya platforma dlya prediktivnogo analiza i upravleniya sostoyaniem zheleznodorozhnoi infrastruktury [Unified corporate automated infrastructure management system (infrastructure diagnostics and monitoring system) – a digital platform for predictive analysis and management of the railway infrastructure condition]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2022, no. 6, pp. 25–28.

### Информация об авторах

*Асалханова Татьяна Николаевна*, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru.

*Давтян Артур Мартикович*, аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: artur.davtyan.2000@list.ru.

### Information about the authors

*Tat'yana N. Asalkhanova*, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: asalk-tatyana@yandex.ru.

*Artur M. Davtyan*, Ph.D. Student of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: artur.davtyan.2000@list.ru.

## Применение теории массового обслуживания и сетей Петри при анализе параметров системы обслуживания тягового подвижного состава методом математического моделирования

И.И. Лакин<sup>1</sup>✉, В.В. Семченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск, Российская Федерация

✉lakin16@mail.ru

### Резюме

Современный тяговый подвижной состав требует актуальной системы технического обслуживания и ремонта, создание которой должно привести к оптимизации ее параметров согласно диаграмме Тагути. Поэтому тема данного исследования – разработка имитационной математической модели эксплуатации и обслуживания с целью факторного анализа и выбора параметров системы обслуживания жизненного цикла составов – на сегодняшний день имеет большую важность. Процесс обслуживания в условиях депо предполагает использование ограниченного числа позиций для планового ремонта по пробегу и непланового ремонта подвижного состава, что соответствует тематике теории массового обслуживания. Для поставленной задачи наиболее точно подходит модель «сеть Петри», когда каждое последующее состояние модели определяется предыдущим дискретным состоянием и заданием на моделирование: размерами полигона, временем оборота, числом пар поездов в сутки, периодичностью ремонтов, а также стохастическими процессами возникновения отказов и случайным временем задержки поездов после отказов и в результате обслуживания. Согласно канонам теории массового обслуживания и сетей Петри разработана программа на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications в среде MS Excel. В статье описан алгоритм программы. В программе последовательно для заданного числа дней моделирования для каждого часа суток определяется необходимость постановки каждого из свободных составов на ремонт, в случае отсутствия свободных ремонтных позиций состав ставится в очередь. Не поставленные на ремонт составы подвываются к поездам, отправляемым в текущий час. В поездке моделируются отказы с заданной интенсивностью, которая считается постоянной.

### Ключевые слова

математическое моделирование, теория массового обслуживания, сети Петри, обслуживание тягового подвижного состава

### Для цитирования

Лакин И.И. Применение теории массового обслуживания и сетей Петри при анализе параметров системы обслуживания тягового подвижного состава методом математического моделирования / И.И. Лакин, В.В. Семченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 65–77. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).65-77.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 25.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 13.12.2023 г.; принята к публикации: 14.12.2023 г.

## Application of queuing theory and Petri nets in the analysis of traction rolling stock maintenance parameters by mathematical modeling

I.I. Lakin<sup>1</sup>✉, V.V. Semchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Railway Engineering Center, Moscow, the Russian Federation

<sup>2</sup>JSC «Road Center for the implementation of the Krasnoyarsk Railway», Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉lakin16@mail.ru

### Abstract

Modern traction rolling stock requires an up-to-date system of maintenance and repair, the creation of which requires optimization of its parameters according to the Taguchi diagram. Therefore the importance of the task makes the topic of the article relevant i.e. the development of a simulation mathematical model of operation and maintenance for the purpose of factor analysis and selection of parameters of the trains' life cycle maintenance system. The maintenance process under the depot conditions involves the use of a limited number of repair positions for both planned mileage repair and unplanned repairs of rolling stock, which corresponds to the topic of the queuing theory. The «Petri net» model is most suitable for this task, when each subsequent state of the model is determined by the previous discrete state and the task for modeling: the size of the polygon, the turnaround time, the number of train pairs per day, the repairs frequency, as well as stochastic processes of failure occurrence and random train delay time after failures and service delay. According to the canons of queuing theory and Petri nets, a program has been developed in the Visual Basic algorithmic language for Applications in the MS Excel environment. The article describes the algorithm of the program. In the program, sequentially for a given number of modeling days for each hour of the day, the need for

each of the free trains to be repaired is determined; in the absence of free repair positions the train is queued. Free trains are tied to trains departing at the current hour. During the trip, failures are simulated with a given intensity, which is considered constant. The article provides examples of simulation results in relation to promising high-speed electric trains.

### Keywords

mathematical modeling, queuing theory, Petri nets, maintenance of traction rolling stock

### For citation

Lakin I.I., Semchenko V.V. Primenenie teorii massovogo obsluzhivaniya i setei Petri pri analize parametrov sistemy obsluzhivaniya tyagovogo podvizhnogo sostava metodom matematicheskogo modelirovaniya [Application of queuing theory and Petri nets in the analysis of traction rolling stock maintenance parameters by mathematical modeling]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 65–77. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).65-77.

### Article info

Received: October 25, 2023; Revised: December 13, 2023; Accepted: December 14, 2023.

### Введение

Тяговый подвижной состав составляет около 30 % от стоимости основных фондов железных дорог. При этом существенную часть времени подвижной состав находится в состоянии технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [1, 2]. Для современного подвижного состава предъявляются достаточно жесткие ограничения ко времени нахождения на ТОиР, который в контрактах жизненного цикла нормируется на уровне не ниже 0,95 [3]. Соблюдение таких условий достаточно затруднено и требует научно-практического обоснования технических и

технологических подходов.

Надежность сложных технических систем во всем мире обеспечивается системой планово-предупредительных ТОиР [4–6] с широким использованием данных бортовых микропроцессорных систем управления и диагностирования и автоматизацией технологических процессов в сервисных депо [4, 7–12]. Современная система ТОиР требует научно-обоснованных технических решений [5, 6, 13]. Схема современного ТОиР представлена на рис. 1.

В процессе эксплуатации (блок 1) бортовая диагностика (блок 2) регистрирует парамет-

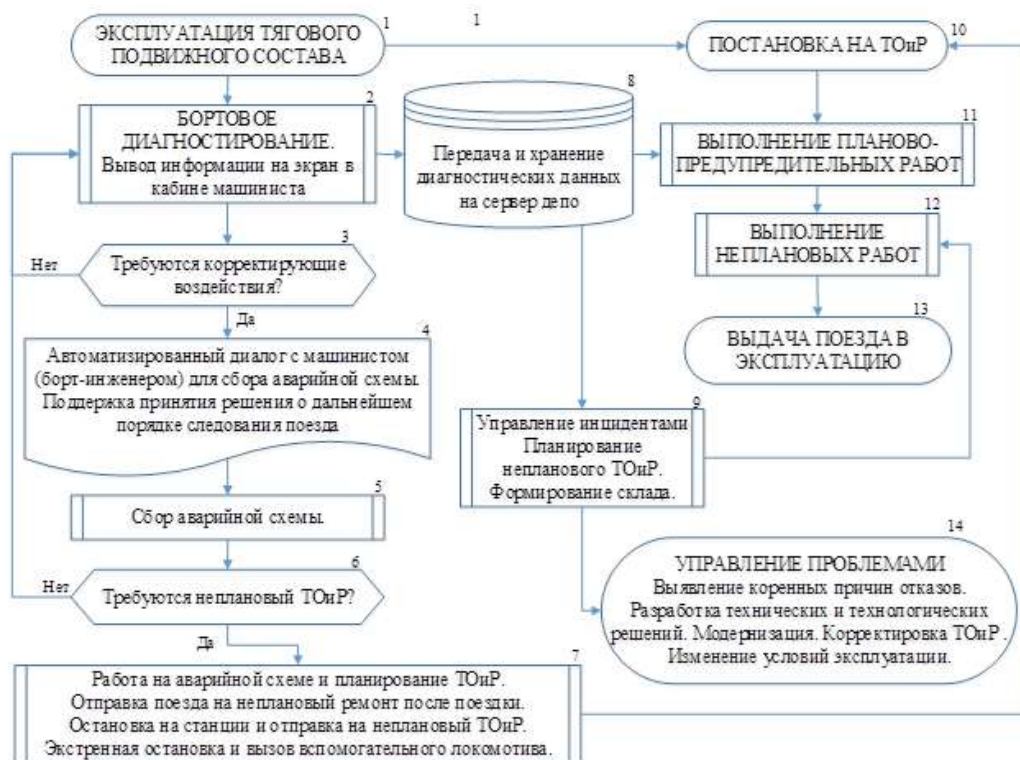


Рис. 1. Схема технического обслуживания и ремонта

Fig. 1. Maintenance and repair scheme

ры технического состояния состава, которые передаются в ситуационный центр депо (блок 8). Если техническое состояние состава требует вмешательства в управление (блок 3), то в диалоге с машинистом (блок 4) принимаются корректирующие меры вплоть до сбора аварийной схемы или остановки поезда (блок 5). Планируется при необходимости неплановый ремонт (блоки 6, 7) или все замечания устраняются на очередном планово-предупредительном ТОиР (блоки 10–12). В результате ТОиР накапливается статистическая информация, используемая как для устранения текущих инцидентов (блок 9), так и для управления выявленными проблемами в целом (блок 14).

Описанная система (см. рис. 1) внедрена в ООО «ЛокоТех», обслуживающем по договору с «РЖД» локомотивы заводов КЗ, НЭВЗ, БМЗ, входящих в Трансмашхолдинг [13], и эксплуатируется в 85 сервисных локомотивных депо при обслуживании около 20 тыс. секций электровозов серий ВЛ80, ВЛ10, ВЛ11, 2/3ЭС4К, ЭП2К, 2/3/4ЭС5К, ЭП1, тепловозов серий ТЭ10, ТЭ116, 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25К2М, ТЭМ2, ТЭМ18 и др. Выполнен комплекс научных исследований, связанных с диагностированием локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления и практическим использованием этих данных в автоматизированной системе управления ТОиР. В результате защищено

пять кандидатских диссертаций и две докторских [5, 6, 8–11].

Для изучения процессов ТОиР предложен метод имитационного математического моделирования постановки подвижного состава на ТОиР с применением теории массового обслуживания и сетей Петри, использование которых описано в статье.

### Принципы управления техническим обслуживанием и ремонтом

Система ТОиР требует оптимизации параметров согласно [14]: более надежный подвижной состав дороже в изготовлении, но требует меньше затрат жизненного цикла на этапе эксплуатации (рис. 2). Снижение начальных затрат на изготовление приводит к повышению затрат на ТОиР. При организации ТОиР требуется решение задачи оптимизации начальных и эксплуатационных затрат. При этом главным показателем надежности является интенсивность отказов  $\lambda$  оборудования [4], которую принято считать величиной постоянной [15]: на этапе приработки интенсивность отказов  $\lambda_{\text{ПР}}$  имеет значение, существенно превышающее установленное в технических условиях  $\lambda_{\text{ТУ}}$  ( $\lambda_{\text{ПР}} \gg \lambda_{\text{ТУ}}$ ), но постепенно снижается до установленного значения  $\lambda_{\text{ПР}} \rightarrow \lambda_{\text{ТУ}}$ . Когда  $\lambda_{\text{ПР}} = \lambda_{\text{ТУ}}$ , считается, что период приработки закончен и начинается период нормальной эксплуатации, когда  $\lambda = \lambda_{\text{ТУ}} = \text{const}$  (рис. 3).

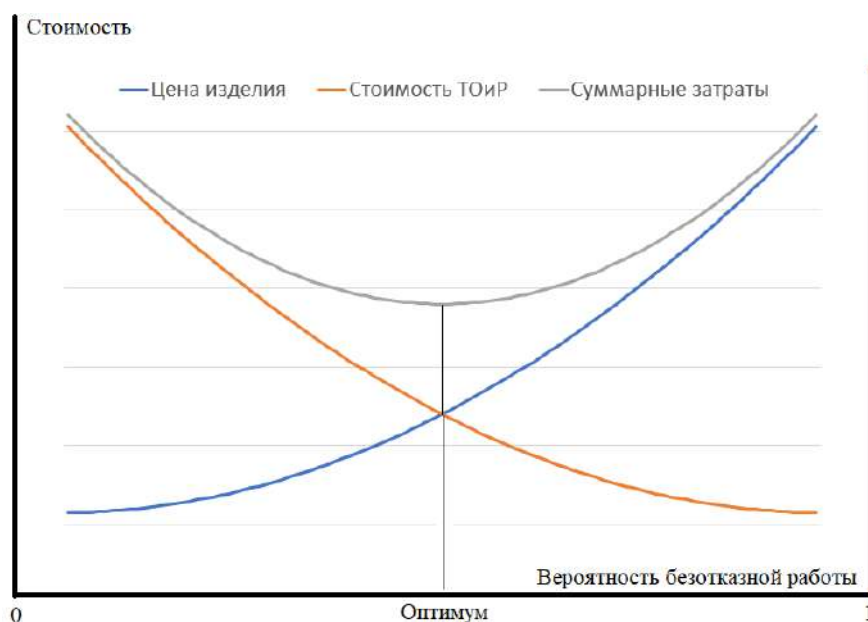


Рис. 2. Диаграмма Тагути  
Fig. 2. Taguchi diagram



Рис. 3. Изменение интенсивности отказов на жизненном цикле оборудования

Fig. 3. Changes in failure rates during the life cycle of equipment

После выработки ресурса и деградации технического состояния оборудования интенсивность отказов вновь начинает расти  $\lambda_{ДЕГ} > \lambda_{ТУ}$ ,  $\lambda_{ДЕГ}(l) \rightarrow \infty$ . При этом вероятность отказа  $Q$  при экспоненциальном распределении случайной величины определяется как интеграл за период времени от  $t_1$  до  $t_2$  или пробегу от  $l_1$  до  $l_2$ :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \lambda e^{-\lambda t} dt = \int_{l_1}^{l_2} \lambda e^{-\lambda l} dl,$$

где при  $t \rightarrow \infty$  или  $l \rightarrow \infty$   $Q \rightarrow 1$ .

Понизить вероятность отказа  $Q$  можно сокращением периода пробега  $\Delta l = l_2 - l_1$ , что как раз возможно за счет системы ТОиР: вероятность безотказной работы  $P = 1 - Q$  при проведении ТОиР повышается, однако может снижаться за счет предотказных состояний, не диагностируемых на ТОиР (рис. 4).

Вероятность отказа  $Q$  будет определяться по вероятности отказа до ТОиР  $Q_{ТОиР}$  с интенсивностью  $\lambda - \lambda_d$  и вероятности деградационного отказа  $Q_d$  с интенсивностью  $\lambda_d$ :

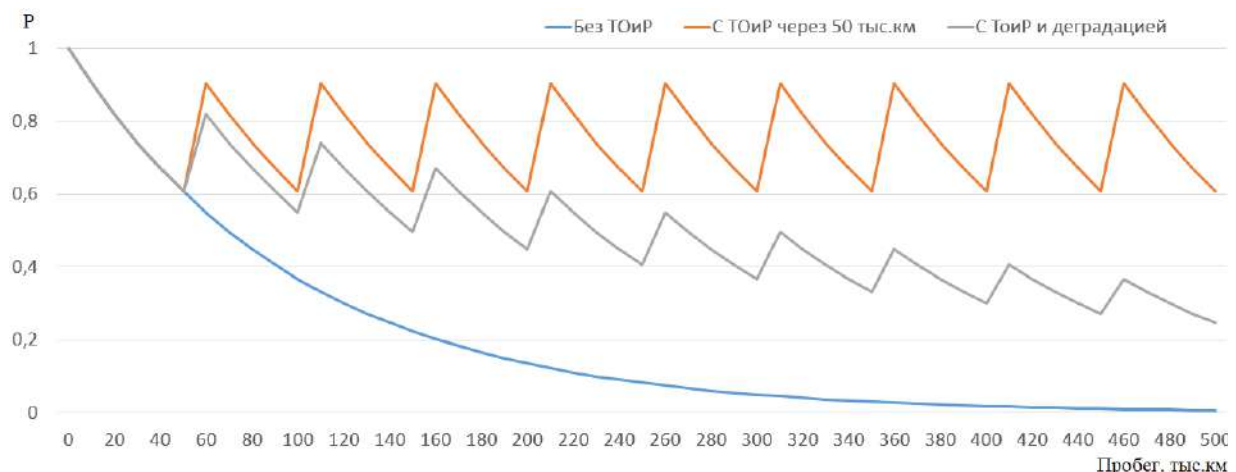
$$Q = Q_{ТОиР} + (1 - Q_{ТОиР}) \cdot Q_d.$$

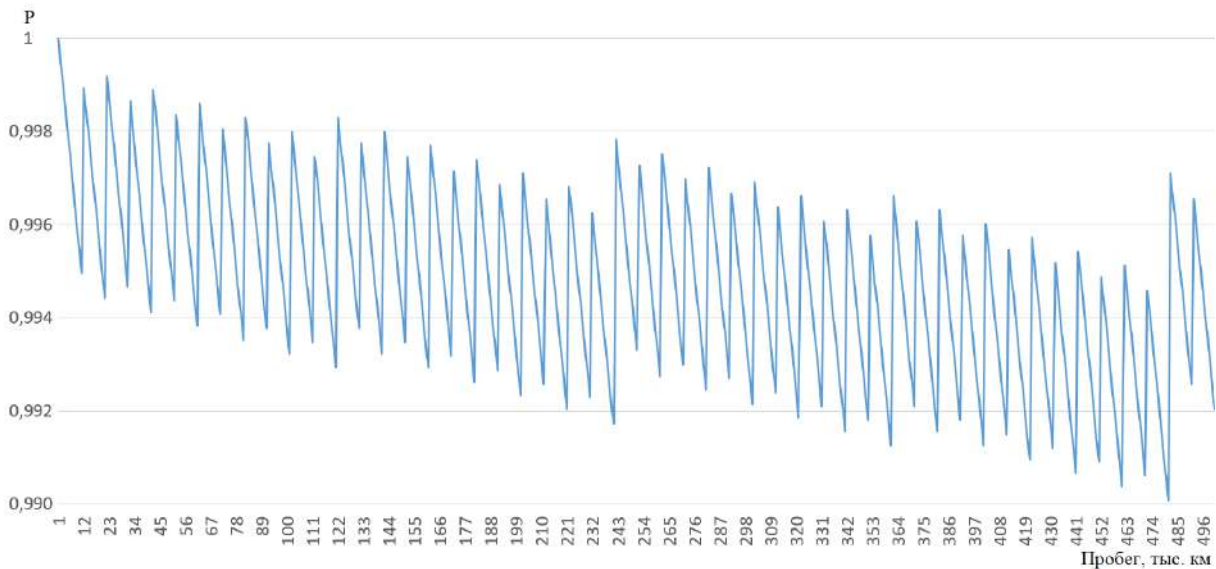
Расчеты выполнены на алгоритмическом языке программирования Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel [16].

На рис. 5 приведен пример аналогичного расчета вероятности безотказной работы состава при пяти различных объемах ТОиР.

#### Разработка математической модели

Исходя из описанных принципов автором разработана имитационная математическая модель эксплуатации и обслуживания тягового подвижного состава на полигоне [12]. ТОиР осуществляется на пунктах технического обслуживания и депо с ограниченным числом

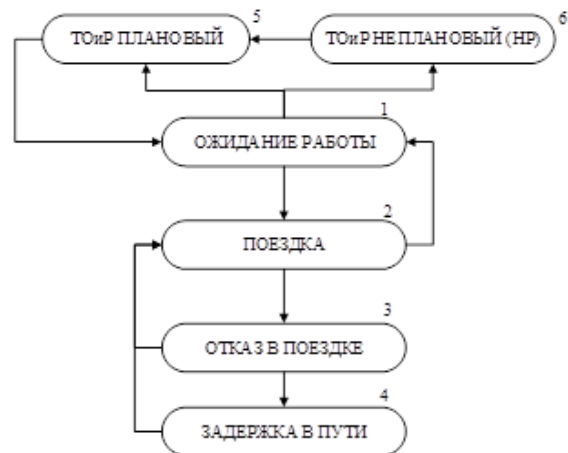
Рис. 4. Вероятность безотказной работы  $P$  при наличии технического обслуживания и ремонта и без таковых с присутствием деградационных отказовFig. 4. Probability of failure-free operation  $P$  in the presence of maintenance and repair and without them in the presence of degradation failures



**Рис. 5.** Вероятность безотказной работы для пяти видов технического обслуживания и ремонта  
**Fig. 5.** Probability of failure-free operation for five types of maintenance and repair

ремонтных позиций  $n \in N$ , наличием  $i$ -ых запасных изделий и приборов (ЗИП)  $z_i \in Z_i$ , трудовых и других  $j$ -ых ресурсов  $r_j \in R_j$ . Кроме того, время проведения ТОиР  $t \in T$  ограничено выдачей составов «под нитки графика». Таким образом, организация ТОиР является типовой задачей теории массового обслуживания [17] – научной дисциплины математического моделирования типовых многократно повторяющихся, поддающихся статистической обработке задач. ТОиР как объект теории массового обслуживания характеризуется случайным и детерминированным поступлением заявок на обслуживание (входной поток заявок  $\alpha$  с интенсивностью  $\lambda$ ), каналами обслуживания  $n \in N$  (числом ремонтных позиций), возможным наличием очереди на обслуживание  $t_{ож} \in T_{ож}$ , а также временем исполнения заявки  $t \in T$  (временем проведения ТОиР) – выходящий поток заявок. Поток заявок с отказом в обслуживании исключается, так как выход неисправного подвижного состава из депо не допустим по соображениям безопасности движения поездов. Эффективность ТОиР можно оценить через следующие показатели Key Performance Indicators (KPI): вероятность  $P$  выполнения ТОиР в заданные сроки и с заданным уровнем затрат всех видов ресурсов  $C$ . Применительно к высокоскоростному движению показатель эффективности  $P$  приоритетней, чем  $C$ .

Составы  $U$  в процессе эксплуатации могут находиться в нескольких статусах (рис. 6).



**Рис. 6.** Статусы состава в эксплуатации  
**Fig. 6.** Statuses of trains in operation

Главный – это собственно эксплуатация: полезная работа в составе поездов. В данном статусе состав  $U$  находится в поезде  $Tr$ . Следующий статус – ожидание работы: состав находится в эксплуатируемом парке, но не совершает полезной работы. Третье основное состояние – ТОиР: состав выведен из эксплуатируемого парка и находится в депо на одном из плановых или на неплановом (НР) виде ТОиР. Статус состава  $U$  в момент времени  $t+1$  определяется его статусом в момент времени  $t$ . Начальным статусом в момент времени  $t$  является исправное техническое состояние в ожидании работы. В момент времени  $t+1$  состав  $U$  может быть поставлен на плановый (блок 5) или неплановый

(блок 6) ТОиР на время  $\Delta t_{\text{ТОиР}}$  (см. рис. 6), если пробег состава критичный. Если в момент времени  $t + 1$  состав  $U$  свободен и есть поезд  $Tr$  к отправлению, то состав подвязывается к этому поезду, после чего его статус – поездка (блок 2). Из статуса поездки поезд  $Tr$  с составом  $U$  (блок 2) состав может успешно завершить поездку (блок 1) или перейти в статус отказа (блок 3), в том числе с задержкой в поездке на время  $\Delta t_{\text{отказ}}$  (блок 4).

При моделировании статусов состава время можно рассматривать как дискретную переменную, например, с точностью до минуты. Анализ показал, что для решаемой задачи определения параметров ТОиР достаточно дискретности в один час:

$$(t + 1) - t = 1 \text{ ч.}$$

Такое изменение статусов хорошо описывается дискретной математической моделью, известной в литературе как универсальная временная стохастическая модель «сеть Петри», нашедшая широкое применение как раз при имитационном анализе систем массового обслуживания [18]. Таким образом, техническое состояние состава в момент времени  $t + 1$   $U(t + 1)$  описывается логическо-математической функцией  $Z$ , зависящий от аргументов: преды-

дущего статуса состава  $U(t)$ , расписания поездов  $Tr$  с заданным временем оборота  $\Delta t_{Tr}$  и пробегом  $\Delta l$ , пробега состава  $L$ , периодичности планово-предупредительных ремонтов  $Km_{\text{ТОиР}}$ , а также от случайного наступления отказа  $F$  со случайными продолжительностью  $\Delta t_F$  и временем восстановления  $\Delta t_{F\text{ТОиР}}$ :

$$U(t + 1) = Z(U(t), Tr, \Delta t_{Tr}, \Delta t_L, L, Km_{\text{ТОиР}}, F, \Delta t_F, \Delta t_{F\text{ТОиР}}).$$

Моделирование сводится в последовательном переходе от времени  $t$  к времени  $t + 1$  за каждые 24 часа суток  $D \in \{1, DayMax\}$ . Возможно задание статуса на несколько часов вперед на дискретное время  $\Delta t$ , например, при определенном времени поездки, ТОиР и др. Модель ТОиР является стохастической, так как наступление статуса отказа  $F$  в поездке, продолжительность задержки поезда в пути  $\Delta t_F$ , время восстановления после отказа на плановом или неплановом ремонте  $\Delta t_{F\text{ТОиР}}$  и даже продолжительность планового ТОиР  $\Delta t_{Tr}$  являются случайными величинами, подчиняющимися различным законам распределения случайной величины: нормальному, экспоненциальному, логнормальному и др. В процессе моделирования участвует  $U_{max}$  составов,  $TrainMax$  поездов в сутки и  $KanavaMax$  ремонтных позиций депо. Таким обра-

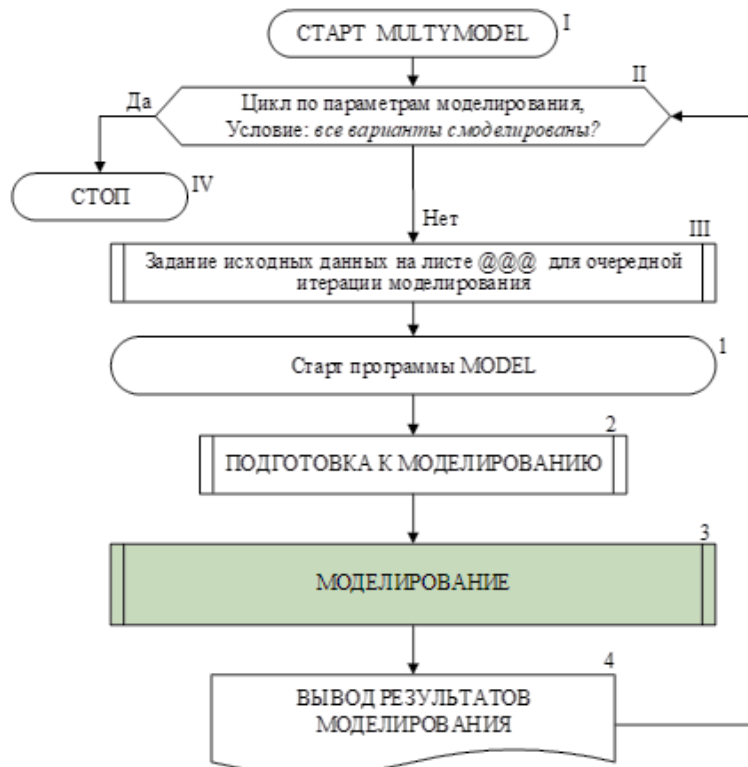


Рис. 7. Общая блок-схема алгоритма модели  
Fig. 7. General block diagram of the model algorithm

зом, приведенная выше формула превращается в систему уравнений:

$$\begin{aligned} U_1(t+1) &= Z(U_1(t), Tr, \Delta t_{Tr}, \Delta t_L, L, Km_{TOиP}, F, \Delta t_F, \Delta t_{F_{TOиP}}); \\ U_2(t+1) &= Z(U_2(t), Tr, \Delta t_{Tr}, \Delta t_L, L, Km_{TOиP}, F, \Delta t_F, \Delta t_{F_{TOиP}}); \dots \\ U_i(t+1) &= Z(U_i(t), Tr, \Delta t_{Tr}, \Delta t_L, L, Km_{TOиP}, F, \Delta t_F, \Delta t_{F_{TOиP}}); \dots \\ U_{max}(t+1) &= Z(U_{max}(t), Tr, \Delta t_{Tr}, \Delta t_L, L, Km_{TOиP}, F, \Delta t_F, \Delta t_{F_{TOиP}}). \end{aligned}$$

Блок-схема алгоритма программы [15] для реализации разработанной модели ТОиР в среде Excel на алгоритмическом языке VBA приведена на рис. 7. После запуска программы (блок I) программа в цикле (блоки II–III, 1–4) меняет исходные данные на листе задания (блок II) и стартует функцию *Model* (блоки 1–4), которая последовательно производит подготовку к моделированию (блок 2), собственно моделирование (блок 3) и вывод информации на листы Excel (блок 4). Программа позволяет в цикле производить многочисленные итерации моделирования для накопления статистики или для факторного анализа.

Подготовка к моделированию начинается с очистки листов файла от предыдущей информации и формирования заголовков. Далее создаются и обнуляются рабочие массивы.

Далее считываются исходные данные: время моделирования в часах, виды ремонтов и межремонтные пробеги в километрах с нормируемым простоем в часах, число ремонтных позиций, число пар поездов в сутки, оборот «туда – обратно» в километрах и часах, строка в массиве *ResultList* для вывода результатов моделирования, задание выводить или нет данные на листы *UnitsList* и *DepoList* (для ускорения многоитерационного моделирования), доля интенсивности отказов от различных видов ТОиР, логнормальное вероятностное распределение продолжительности ремонтов и задержки рейсов, интенсивность отказов всех категорий, другие необходимые исходные данные. Затем запускается генератор случайных чисел *Randomize* и рассчитывается расписание по числу заданных пар поездов.

Расчеты в модели выполняются согласно алгоритму функцией *Model* (рис. 8), которая последовательно для каждого дня от первого до максимально заданного *DayMax* (блок 3.1) и для каждого часа суток (блок 3.2) выполняет проверку вернувшихся из поездки составов и

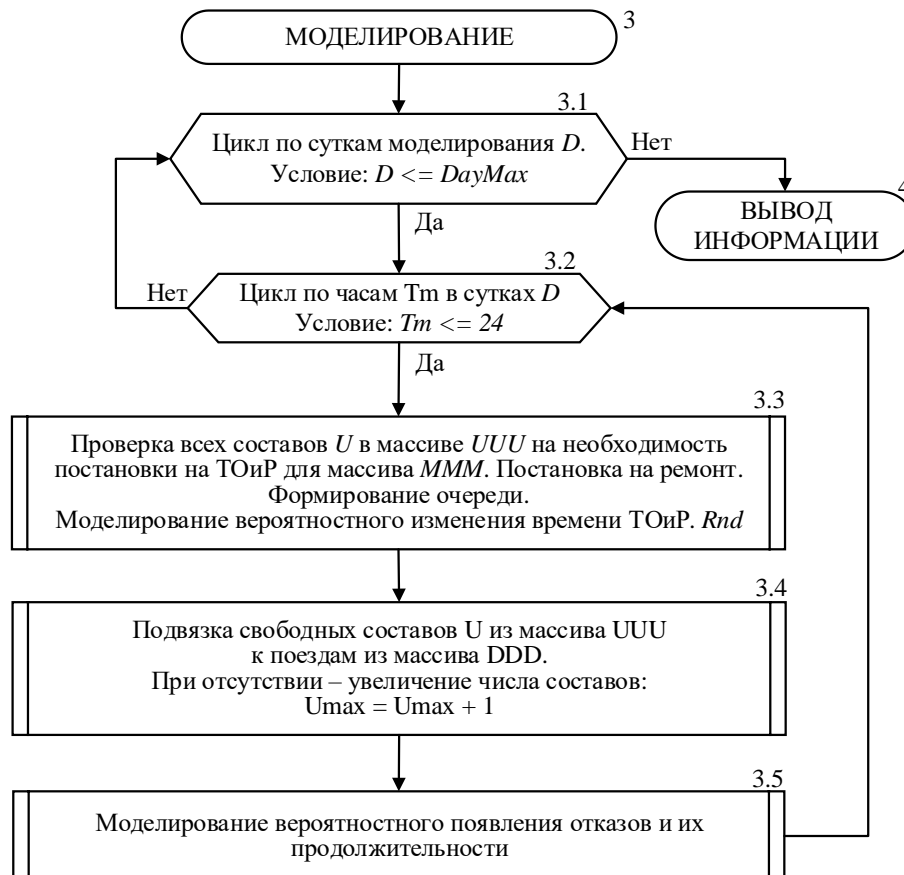


Рис. 8. Блок-схема одной итерации моделирования  
Fig. 8. Flowchart of one simulation iteration



находящихся в состоянии ожидания работы необходимость их постановки на один из видов ремонта от большего к меньшему (блок 3.3). Не поставленные на ТОиР составы подвзывает к поездам текущего часа отправления (блок 3.4). При отсутствии свободных составов их число увеличивается на один – в результате определяется минимально необходимое число составов. В поездке в случае задания моделируются отказы составов с заданными значениями интенсивностей  $\lambda$  (блок 3.5). Результаты моделирования выводятся на листы рабочего Excel-файла (блок 4).

Блок-схема алгоритма работы с ТОиР приведена на рис. 9. Работа начинается с цикла по всем составам  $U$  (блок 3.3.1) проверки на необходимость постановки на один из заданных видов ТОиР от больших к меньшему (блок 3.3.2). Если обнаружена необходимость постановки на ремонт (блок 3.3.2), то проверяется

наличие свободной ремонтной позиции (блок 3.3.3). Если позиция найдена, то на нее ставится состав (блок 3.3.7) для выполнения ТОиР.

Если свободных ремонтных позиций нет, то перед постановкой в очередь проверяется возможность отправки состава в поездку (блок 3.3.4) при условии, что за оборот пробег  $\Delta L$  не превысит максимально допустимого для рассматриваемого вида ТОиР  $L_{\text{ТОиР}}$  с учетом допуска на пробег  $\Delta L_{\text{ТОиР}}$ :

$$L_{\text{ТОиР}} + \Delta L_{\text{ТОиР}} \geq \Delta L.$$

Функция отправки состава в дополнительную поездку (блок 3.3.5) позволила повысить эффективность модели: сократить очередь и число потребных составов (до 20%). Если поездка по условию отсутствия перепробега не выполняется, то состав ставится в очередь (блок 3.3.6). В модуле управления ремонтами имеет стохастическую продолжительность ТОиР  $\Delta t$ : при заданном ожидаемом значении  $\Delta t$

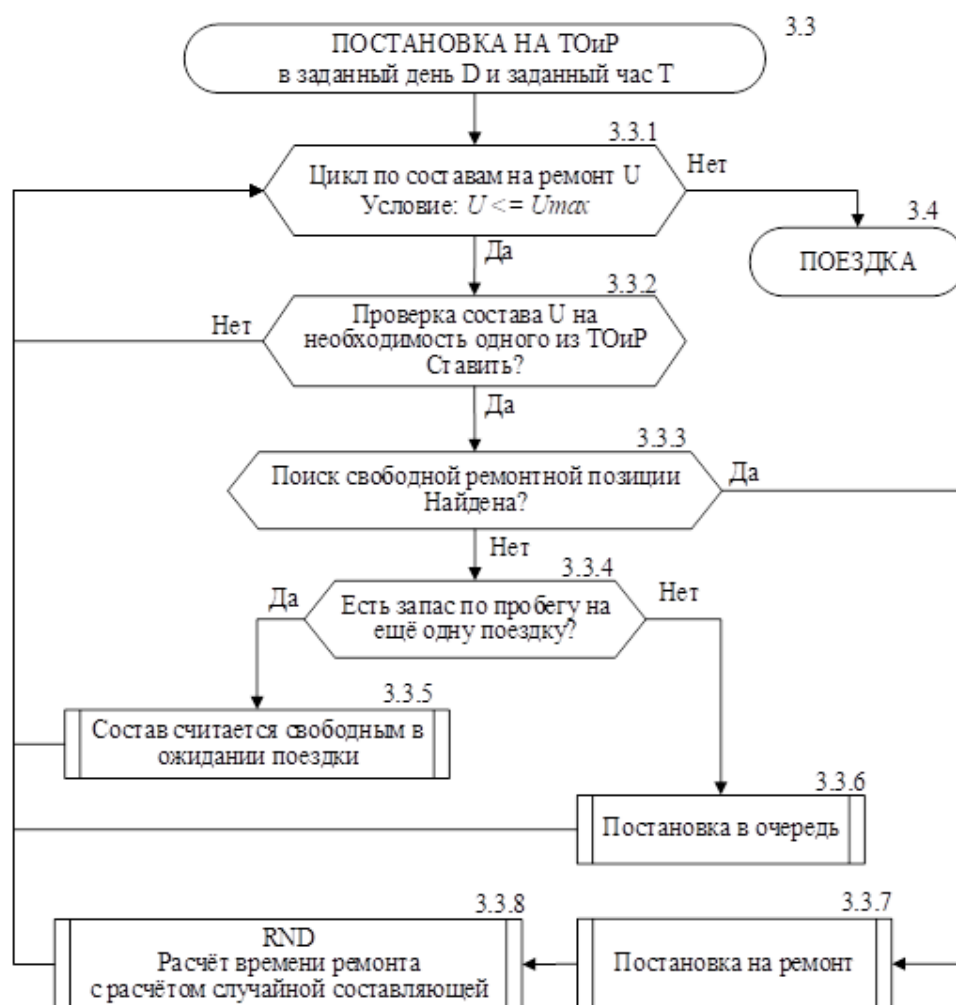


Рис. 9. Блок-схема выполнения технического обслуживания и ремонта

Fig. 9. Flowchart of maintenance and repair

преобразуется по заданному в начальных условиях преобразованию согласно логнормальному закону распределения случайной величины. Полученное значение  $\Delta t$  (блок 3.3.8) регистрируется в массивах  $UUU$  (составы) и  $DDD$  (ремонтные позиции). На этом работа с ТОиР в модели на текущий день и час заканчивается.

После моделирования ТОиР программа моделирует поездку (рис. 10). Последовательно для каждого поезда в расписании (блок 3.4.1) проверяется необходимость его отправки на текущий час  $Tm$  (блок 3.4.2). При наступлении времени отправления происходит поиск свободного состава в массиве  $UUU$  (блок 3.4.3). Если свободный состав найден (блок 3.4.4), то он подвязывается к поезду (блок 3.4.6). Если свободных составов больше одного, то выбира-

ется состав с минимальным пробегом (блок 3.4.4). Если свободных составов нет, то их число  $U_{max}$  увеличивается на один:

$$U_{max} = U_{max} + 1.$$

Новый состав подвязывается к поезду и отправляется в поездку (блок 3.4.6). Так определяется минимально потребное число составов. После отправки состава с поездом в поездку (блок 3.4.6) он считается занятым поездом  $Tr$  на время оборота  $\Delta t_{Tr}$ . При наступлении отката (блок 3.4.7 – моделирования отката) время поездки может быть увеличено согласно ожидаемому времени задержки с учетом его логнормального распределения. По окончании поездки через время  $\Delta t_{Tr}$  с учетом стохастической составляющей состав переводится в состояние ожидания работы. Цикл работы с очередным

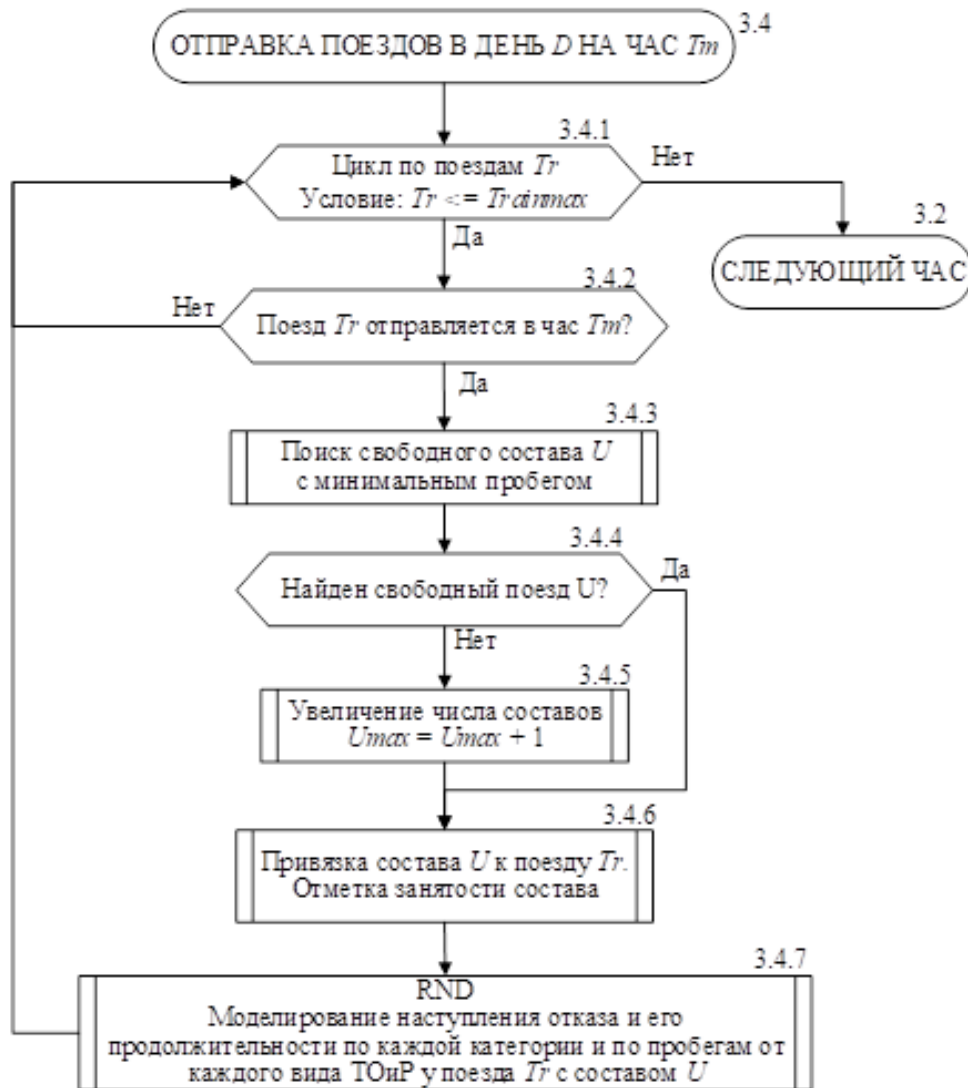


Рис. 10. Блок-схема моделирования поездки

Fig. 10. Trip Simulation Flowchart

часом  $T_m$  очередных суток  $D$  заканчивается. По окончании моделирования за заданные  $DayMax$  дней результаты моделирования выводятся на рабочие листы таблицы.

### Моделирование

По предложенной стохастической дискретной модели в виде сети Петри [19] в соответствии с канонами теории массового обслуживания выполнено многофакторное моделирование эксплуатации и ремонта перспективных высокоскоростных электропоездов для полигона Санкт-Петербург – Москва [20]. Далее приведен пример расчетов для 16-ти и 32-х пар поездов в

сутки при детерминированном и стохастическом моделировании (табл.). Полигон «туда – обратно» принят в 1 400 км при обороте за 7 ч (с учетом подготовки к поездке). Принято пять видов отказов, из которых только категория А приводит к задержке в пути ( $\lambda_A = 0,5$  отк./млн км). При стохастическом моделировании выполнено по 100 итераций моделирования для расчета математического ожидания  $M$ , среднеквадратичного отклонения (СКО), коэффициента вариации  $K_V$ , минимально и максимально встречавшихся значений.

Статистические результаты моделирования  
Statistical simulation results

Параметры Parameters	$M$ (mathematical expectation)	СКО standard deviation	$K_V$ Variation coefficient	min	max
Детерминированное, 16 пар поездов в сутки Deterministic, 16 pairs of trains per day					
Потребное число составов Required number of trains	15	–	–	–	–
В работе, % In operation, %	31,1	–	–	–	–
Ожидание работы, % Awaiting operation, %	66,09	–	–	–	–
Ремонт, % Repair, %	2,8	–	–	–	–
Коэффициент технической готовности Technical readiness coefficient	0,972	–	–	–	–
Занятость канав, % Ditch occupancy, %	5,24	–	–	–	–
Детерминированное, 32 пары поездов в сутки Deterministic, 32 pairs of trains per day					
Потребное число составов Required number of trains	22	–	–	–	–
В работе, % In operation, %	42,2	–	–	–	–
Ожидание работы, % Awaiting operation, %	53,97	–	–	–	–
Ремонт, % Repair, %	3,61	–	–	–	–
Коэффициент технической готовности Technical readiness coefficient	0,964	–	–	–	–
Занятость канав, % Ditch occupancy, %	9,91	–	–	–	–
Вероятностное, 16 пар поездов в сутки Probabilistic, 16 pairs of trains per day					
Потребное число составов Required number of trains	15,41	0,57	0,037	15	17
В работе, %	30,34	1,07	0,036	27,46	31,13

In operation, %					
Ожидание работы, % Awaiting operation, %	66,76	1,19	0,018	65,89	70,26
Ремонт, % Repair, %	2,90	0,14	0,047	2,27	2,98
Коэффициент технической готовности Technical readiness coefficient	0,971	0,001	0,001	0,97	0,977
Занятость канав, % Ditch occupancy, %	5,25	0,168	0,032	4,49	5,40
Очередь, составов Queue, trains	0,31	0,643	2,075	0	2
Очередь, % Queue, %	0,08	0,023	2,830	0	0,12
Число отказов категории А Number of category A failures	20,86	4,06	0,194	11	28
Интенсивность при моделировании, отк./млн км Simulation intensity, failures/million km	0,503	0,098	0,195	0,265	0,676
Погрешность модели, % Model error, %	0,6	–	–	–	–
Число задержек поездов Number of train delays	20,74	4,007	0,193	10	32
Вероятность соблюдения расписания дви- жения поездов Probability of keeping train schedules	0,993	0,00014	0,00014	0,99892	0,9996
Вероятностное, 32 пары поездов в сутки Probabilistic, 32 pairs of trains per day					
Потребное число составов Required number of trains	23,08	0,52	0,023	22	25
В работе, % In operation, %	40,5	0,91	0,022	37,3	42,4
Ожидание работы, % Awaiting operation, %	56,0	1,01	0,018	53,7	59,3
Ремонт, % Repair, %	3,49	0,12	0,033	3,30	3,84
Коэффициент технической готовности Technical readiness coefficient	0,965	0,001	0,001	0,961	0,967
Занятость канав, % Ditch occupancy, %	9,43	0,165	0,017	9,27	9,92
Очередь, составов Queue, trains	0,51	0,66	1,29	0	2
Очередь, % Queue, %	0,009	0,023	2,57	0	0,121
Число отказов категории А Number of category A failures	40,8	5,63	0,138	30	54
Интенсивность при моделировании, отк./млн км Simulation intensity, failures/million km	0,492	0,068	0,138	0,362	0,651
Погрешность модели, % Model error, %	1,6				
Число задержек поездов Number of train delays	42	5,76	0,137	32	54
Вероятность соблюдения расписания дви- жения поездов Probability of keeping train schedules	0,9993	0,00009	0,0001	0,9991	0,9995

**Заключение**

Использование модели для анализа эффективности эксплуатации и обслуживания составов высокоскоростных перспективных отечественных электропоездов показало высокую эффективность предложенного методического подхода и соответ-

ствующего разработанного программного обеспечения [15]. Исследования с использованием предложенного метода и разработанного программного обеспечения будут продолжены.

**Список литературы**

1. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Введ. 2017–09–01. М. : Стандартинформ, 2017. 16 с.
2. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В.А. Гапанович, В.Е. Андреев, Митрохин Ю.В. и др. М. : ИРИС-ГРУПП, 2012, 575 с.
3. Когда и как заключать контракт жизненного цикла: новые случаи применения с 2022 года // Госконтракт : сайт. URL : <https://goscontract.info/kontrakt/izuchaem-kontrakty-zhiznennogo-tsikla> (Дата обращения: 23.10.2023).
4. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. Введ. 2022–01–01. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 40 с.
5. Семёнов А.П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2021. 379 с.
6. Пустовой И.В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2018. 181 с.
7. Грачев В.В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов : дис. ... д-ра техн. наук. СПб, 2019. 434 с.
8. Лакин И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 195 с.
9. Аболмасов А.А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 180 с.
10. Хромов И.Ю. Анализ влияния режимов эксплуатации на техническое состояние локомотивов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 187 с.
11. Мельников В.А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления : дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 210 с.
12. Свидетельство № 2023663017. Модель технического обслуживания и ремонта скоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики / И.И. Лакин. № 2023660448 : заявл. 23.05.2023 ; опубл. 19.06.2023.
13. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К.В. Липа, А.А. Белинский, В.Н. Пустовой и др. М. : Локомотивные Технологии, 2015. 212 с.
14. Методы Тагути // Центр Креативных Технологий : сайт. URL : <https://www.inventech.ru/pub/methods/metod-0030/> (Дата обращения 23.10.2023).
15. Горский А.В., Воробьёв А.А. Надежность электроподвижного состава. М. : Маршрут, 2005. 303 с.
16. Семченко В.В., Мальцев Е.А., Раздобаров А.В. Опыт внедрения системы мониторинга технического состояния и режимов работы электровозов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : труды Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Красноярск, 2020. С. 327–332.
17. Уокенбах Д. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA. М., СПб., Киев : Диалектика, 2012. 944 с.
18. Плескунов М.А. Теория массового обслуживания. Екатеринбург : УрФУ, 2022. 264 с.
19. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М. : Мир, 1984. 264 с.
20. Дороги на высоких скоростях // Ведомости. Промышленность : сайт. URL : [https://www.vedomosti.ru/industry/infrastructure\\_development/articles/2023/11/29/1008492-dorogi-na-visokih-skorostyah](https://www.vedomosti.ru/industry/infrastructure_development/articles/2023/11/29/1008492-dorogi-na-visokih-skorostyah) (Дата обращения 23.10.2023).

**References**

1. GOST 18322-2016. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhniki. Terminy i opredeleniya [State Standard 18322-2016. Maintenance and repair system of engineering. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2017. 16 p.
2. Gapanovich V.A., Andreev V.E., Mitrokhin Yu.V., Yagovkin A.N., Ivanov K.V., Alferov V.Yu., Kiselev V.I., Lakin I.K., Ivanov A.A. Eksploatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava [Operation and maintenance of rolling stock]. Moscow: IRIS-GRUPP Publ., 2012. 575 p.
3. Kogda i kak zaklyuchat' kontrakt zhiznennogo tsikla: novye sluchai primeneniya s 2022 goda (elektronnyi resurs) [When and how to conclude a life cycle contract: new applications from 2022 (electronic resource)]. Available at: <https://goscontract.info/kontrakt/izuchaem-kontrakty-zhiznennogo-tsikla> (Accessed October 23, 2023).
4. GOST R 27.102-2021. Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob'ekta. Terminy i opredeleniya [State Standard R 27.102-2021. Dependability in technics. Dependability of item. Terms and definitions]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 40 p.
5. Semenov A.P. Model' upravleniya zhiznennym tsiklom lokomotivov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Model of locomotive life cycle management using modern methods of technical diagnostics]. Doctor's thesis. Moscow, 2021. 379 p.

6. Pustovoi I.V. Razrabotka informatsionno-dinamicheskoi modeli upravleniya servisnym tekhnicheskim obsluzhivaniem i remontom lokomotivov [Development of an information-dynamic management model for maintenance and repair of locomotives]. Ph.D.'s thesis. Omsk, 2018. 181 p.
7. Grachev V.V. Nauchnye osnovy primeneniya metodov intellektual'nogo analiza dannykh dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov [Scientific bases of application of data mining methods for monitoring the technical condition of locomotives]. Doctor's thesis. Saint Petersburg, 2019. 434 p.
8. Lakin I.I. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmnykh kompleksov [Monitoring of the technical state of locomotives according to on-board hardware-software complexes]. Ph.D.'s thesis. Moscow: MIIT, 2016. 195 p.
9. Abolmasov A.A. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem tyagovogo podvizhnogo sostava v usloviyakh servisnogo obsluzhivaniya [Technical state management of the traction rolling stock in the conditions of service maintenance]. Ph.D.'s thesis. Moscow: MIIT, 2017. 180 p.
10. Khromov I.Yu. Analiz vliyaniya rezhimov ekspluatatsii na tekhnicheskoe sostoyanie lokomotivov [Analysis of the influence of operating modes on the technical condition of locomotives]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2021. 187 p.
11. Mel'nikov V.A. Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya teplovozov 2TE116U s primeneniem dannykh bortovykh sistem upravleniya [Improvement of methods for diagnosing diesel locomotives 2TE116U using data from on-board control systems]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2022. 210 p.
12. Lakin I.I. Certificate of registration of a computer program 2023663017, 19.06.2023.
13. Lipa K.V., Belinskii A.A., Pustovoi V.N. et al. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov. Teoriya i praktika [Monitoring of technical condition and operating modes of locomotives. Theory and practice]. Moscow: Lokomotivnye Tekhnologii Publ., 2015. 212 p.
14. Metody Taguti (Elektronnyi resurs) [Taguchi Methods (electronic resource)]. Available at: <https://www.inventech.ru/pub/methods/metod-0030/> (Accessed October 23, 2023).
15. Gorskii A.V., Vorob'ev A.A. Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava [Reliability of electric rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 303 p.
16. Semchenko V.V., Maltsev E.A., Razdobarov A.V. Opyt vnedreniya sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov raboty elektrovozov [Monitoring system experience for the technical condition and operating modes of electric locomotives]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekspluatatsiya i obsluzhivanie elektronnoy i mikroprotessornoy oborudovaniya tyagovogo podvizhnogo sostava»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation «Operation and maintenance of electronic and microprocessor equipment of traction rolling stock»]. Krasnoyarsk, 2020, pp. 327–332.
17. Walkenbach J. Excel 2010: professional'noe programmirovaniye na VBA [Excel 2010: professional programming in VBA]. Moscow, Saint Petersburg, Kiev: Dialektika Publ., 2012. 944 p.
18. Pleskunov M.A. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Theory of queuing]. Ekaterinburg: UrFU Publ., 2022. 264 p.
19. Peterson J.L. Teoriya setei Petri i modelirovaniye system [Petri net theory and the modeling of systems]. Moscow: Mir Publ., 1984. 264 p.
20. Dorogi na vysokikh skorostyakh (Elektronnyi resurs) [Roads at high speeds (Electronic resource)]. Available at: [https://www.vedomosti.ru/industry/infrastructure\\_development/articles/2023/11/29/1008492-dorogi-na-visokih-skorostyah](https://www.vedomosti.ru/industry/infrastructure_development/articles/2023/11/29/1008492-dorogi-na-visokih-skorostyah) (Accessed October 23, 2023).

### Информация об авторах

**Лакин Игорь Игоревич**, кандидат технических наук, ведущий эксперт группы интеграции систем управления, диагностики, безопасности и радиосвязи, Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, г. Москва; e-mail: Lakin16@mail.ru.

**Семченко Виктор Васильевич**, кандидат технических наук, генеральный директор АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск; e-mail: office@dcv.ru.

### Information about the authors

**Igor' I. Lakin**, Ph.D. in Engineering Science, Leading expert of the Control, Diagnostic, Safety and Radio Communication Systems Integration Group, Railway Engineering Center, Moscow; e-mail: lakin16@mail.ru.

**Victor V. Semchenko**, Ph.D. in Engineering Science, General Director of JSC «Road Center for the implementation of the Krasnoyarsk Railway», Krasnoyarsk; e-mail: office@dcv.ru.

## Методика принятия проектных решений по изменению облика и мощности мультимодального транспортного узла

М.В. Нечипорук<sup>1</sup>✉, В.А. Анисимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉Miranaforeverrr@mail.ru

### Резюме

Стабильная тенденция роста экспортных перевозок топливно-энергетических грузов в направлении портов тихоокеанского побережья Дальнего Востока Российской Федерации требует значительного усиления мощности транспортной инфраструктуры Восточного полигона, особенно в нынешней геополитической ситуации. В этой связи особую актуальность приобретает задача эффективного использования существующих резервов провозной и пропускной способностей объектов железнодорожного и морского транспорта, их комплексного развития на основе сбалансированности параметров, определяющих производительность железнодорожной и морской портовой инфраструктуры. В связи с этим была разработана методика принятия проектных решений по изменению облика и мощности мультимодального транспортного узла с учетом взаимодействия объектов железнодорожного и морского транспорта и надежности их функционирования. Применены методология структурного системного анализа, теория систем, принцип декомпозиции, теория множеств, основы теории графов и теории надежности, а также методы системного анализа, математического моделирования процессов и систем, принятия решений, динамического программирования, многокритериальной оптимизации, экономической оценки эффективности проектных решений. Обоснована актуальность задачи эффективного использования существующих резервов провозной и пропускной способностей железнодорожной и морской портовой инфраструктуры, ее всестороннего развития на основе сбалансированности технических и технологических параметров. Предложенная методика позволяет сформировать область эффективных стратегий развития мультимодального транспортного узла для принятия решений по изменению объектов железнодорожного и морского транспорта с целью повышения их функциональности, конструктивного взаимодействия и безопасности.

### Ключевые слова

транспортная инфраструктура, мультимодальный транспортный узел, железнодорожный и морской транспорт, провозная способность, пропускная способность, облик и мощность мультимодального транспортного узла, технические и технологические параметры, методика принятия проектных решений, стратегия развития

### Для цитирования

Нечипорук М.В. Методика принятия проектных решений по изменению облика и мощности мультимодального транспортного узла / М.В. Нечипорук, В.А. Анисимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 78–87. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).78-87.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 15.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 24.11.2023 г.; принята к публикации: 28.11.2023 г.

## Methodology of making design decisions to change the appearance and capacity of a multimodal transport hub

M.V. Nechiporuk<sup>1</sup>✉, V.A. Anisimov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Saint Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg, the Russian Federation

✉Miranaforeverrr@mail.ru

### Abstract

The stable trend of growth in export transportation of fuel and energy cargo in the direction of the ports of the Pacific coast of the Russian Federation Far East requires a significant increase in the capacity of the transport infrastructure of the Eastern Polygon, especially in the current geopolitical situation. In this regard, the task of effectively using the existing reserves of freight and throughput capacity of railway and sea transport facilities, their comprehensive development based on the balance of parameters that determine the capacity of the railway and sea port infrastructure, is of particular relevance. To solve this problem, a methodology has been developed of making design decisions to change the appearance and capacity of a multimodal transport hub, taking into account the interaction of railway and sea transport facilities and the reliability of their functioning. The methodology of structural system analysis, systems theory, decomposition principle, set theory, fundamentals of graph theory and reliability theo-

ry were applied as well as the methods of system analysis, mathematical modeling of processes and systems, decision making, dynamic programming, multicriteria optimization and economic assessment of the effectiveness of design solutions. The relevance is substantiated of the task of effectively using the existing reserves of the railway and sea port infrastructure carrying and throughput capacity and its comprehensive development based on the balance of technical and technological parameters that determine the appearance and capacity of railway and sea transport facilities, taking into account their interaction and reliability of operation. The developed methodology makes it possible to form an area of effective strategies for the development of a multimodal transport hub for making decisions on changing the appearance and capacity of railway and sea transport facilities, taking into account their interaction and operation reliability.

### Keywords

transport infrastructure, multimodal transport hub, rail and sea transport, carrying capacity, throughput capacity, appearance and capacity of a multimodal transport hub, technical and technological parameters, methods of making design decisions, development strategy

### For citation

Nechiporuk M.V., Anisimov V.A. Metodika prinyatiya proyektnykh reshenii po izmeneniyu oblika i moshchnosti mul'timodal'nogo transportnogo uzla [Methodology of making design decisions to change the appearance and capacity of a multimodal transport hub]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 78–87. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).78-87.

### Article info

Received: October 15, 2023; Revised: November 24, 2023; Accepted: November 28, 2023.

### Введение

В последнее десятилетие в направлении портов тихоокеанского побережья Дальнего Востока России зафиксирован стабильный рост потребности в экспортных перевозках топливно-энергетических природных ресурсов, требующий существенного усиления провозной способности транспортной инфраструктуры Восточного полигона, особенно в нынешней геополитической ситуации, когда коренным образом изменилась логистика грузовой базы в связи с переориентацией экспортных потоков с Запада на Восток. В этой связи особую актуальность приобретает задача эффективного использования существующих резервов провозной и пропускной способностей железнодорожной и морской портовой инфраструктуры, ее комплексного развития на основе сбалансированности технических и технологических параметров, определяющих облик и мощность объектов железнодорожного и морского транспорта с учетом их взаимодействия и надежности функционирования.

Основная доля экспортных, импортных и транзитных грузопотоков приходится на мультимодальные перевозки. На их эффективность существенное влияние оказывает взаимодействие объектов разных видов транспорта, так как при мультимодальных перевозках около 70 % от общего времени доставки грузов приходится на их нахождение в транспортных узлах, где осуществляется перемещение грузов с одного вида транспорта на другой. В Стратегии

пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г. [1] заявлено о создании единой сети национальных мультимодальных транспортных узлов (МТУ) и организации взаимодействия между ними в освоении внутренних и внешнеторговых грузопотоков.

Для совершенствования МТУ разных видов транспорта и повышения эффективности их взаимодействия требуется комплексная оценка облика, мощности и надежности объектов узла. Объекты МТУ взаимосвязаны и взаимозависимы, поэтому согласованность (сбалансированность) их технических и технологических параметров в значительной степени влияет на эксплуатационную надежность, провозную и перерабатывающую способность всего транспортного узла.

В настоящее время наблюдается дисбаланс между растущим объемом погрузки и невыполнением норм выгрузки экспортных грузов в морских портах, что негативно влияет на эксплуатационную надежность железнодорожных подходов к портам мультимодальной транспортной сети, приводит к необходимости отставления от движения поездов, отказам в продвижении экспортных грузопотоков и вывозе порожних вагонов, увеличивает сроки доставки грузов и время оборота вагонов.

Согласно [2, 3] временно отставленный от движения («брошенный») состав поезда – это состав грузового поезда без локомотива, задержанный в продвижении к станции назначения по коммерческим, техническим или тех-



нологическим причинам на железнодорожной станции ОАО «РЖД».

Основными причинами отставления от движения грузовых поездов являются несвоевременный подход судов, ожидание накопления судовых партий, недостаточность площадей складов и емкостей нефтебаз, отказы в работе выгрузочных и погрузочных устройств. Для «подъема» временно отставленных от движения поездов необходимо выделение ниток графика на следование локомотивов резервом, что снижает пропускную способность направления, производительность локомотивов и увеличивает эксплуатационные расходы. Кроме того, требуются дополнительные затраты на транспортировку и работу локомотивных бригад и осмотровиков вагонов.

На рис. 1 представлена диаграмма количества поездов, временно отставленных от движения на Дальневосточной железной дороге в 2009–2022 гг.

Ущерб для ОАО «РЖД» от простоя временно отставленных от движения поездов включает в себя потери от неиспользования вагонного парка из-за непроизводительного простаивающих вагонов, затраты из-за снижения пропускной способности участков, дополнительной поездной и маневровой работы, затраты на «подъем» поездов, а также потери от простоя «чужих» вагонов в отставленных поездах и не вывезенного груза в период действия конвенционных запретов [2].

Для сокращения количества отставленных поездов и издержек на их «подъем» необходимо

совершенствовать и повышать эффективность взаимодействия объектов МТУ на основе поиска оптимальных и сбалансированных значений параметров, характеризующих их облик, мощность и эксплуатационную надежность.

В статье предлагается методика принятия проектных решений по изменению облика и мощности МТУ с учетом взаимодействия объектов железнодорожного и морского транспорта и надежности их функционирования, которая направлена на решение обозначенной проблемы.

### Теоретические основы

Обобщая определения, приведенные в исследованиях [4–6], под термином «мульти-модальный транспортный узел» будем понимать транспортный комплекс, объединяющий в себе технологически связанные между собой объекты разных видов транспорта, обеспечивающие перевозку грузов и пассажиров. МТУ может включать в себя объекты железнодорожного (станции и перегоны), водного (морские и речные порты), трубопроводного, автомобильного, воздушного транспорта, связывающие их автомобильные дороги и рельсовые пути, а также логистические центры с грузовыми терминалами и складскими комплексами, пункты транспортного страхования и таможенного оформления грузов, организации, оказывающие транспортно-экспедиторские услуги. В МТУ осуществляется техническое, технологическое, информационное, экономическое и правовое взаимодействие различных видов транспорта и субъектов, участвующих в обеспечении



Рис. 1. Количество поездов, временно отставленных от движения на Дальневосточной железной дороге в 2009–2022 гг.

Fig. 1. Number of trains temporarily suspended on the Far Eastern Railway for the period of 2009–2022

печении мультимодальных перевозок.

В связи с тем, что основной объем экспортных, импортных и транзитных мультимодальных перевозок выполняется железнодорожным и морским транспортом, ограничимся объектами данных видов транспорта.

При разработке методики принятия проектных решений по изменению облика и мощности МТУ были решены следующие задачи:

1. Проанализированы причины задержек в продвижении составов грузовых поездов [7], определены факторы, снижающие качество взаимодействия инфраструктурных объектов железнодорожного и морского транспорта в МТУ, и выполнена их систематизация с применением инфраструктурных, технологических, социально-экономических, нормативно-правовых и природно-климатических признаков.

2. Сформулированы стратегические цели функционирования и развития МТУ. На основе использования сбалансированной системы показателей (ССП) определены критерии оценки проектных альтернатив изменения облика объектов узла, характеризующие их мощность, эффективность и эксплуатационную надежность [7–9]. ССП позволила установить причинно-следственные связи между стратегическими целями, ключевыми показателями оценки проек-

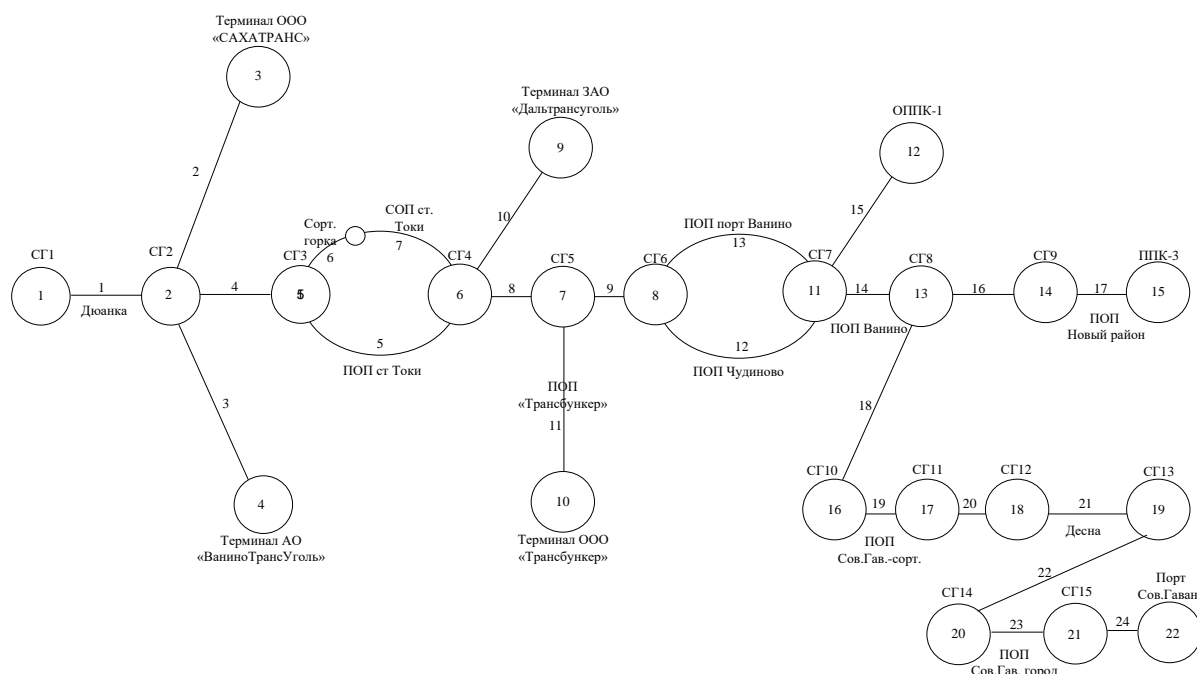
ных альтернатив, техническими и технологическими параметрами объектов МТУ.

Проектной альтернативой изменения облика и мощности МТУ является любой возможный вариант изменения облика и мощности объектов МТУ, который включает в себя комплекс мероприятий и технологий их реализации, направленный на достижение поставленных целей.

3. С применением теории систем, структурного системного анализа, принципа декомпозиции и теории множеств разработаны теоретико-множественные модели МТУ для математического описания процессов функционирования и развития объектов железнодорожного и морского транспорта, а также их взаимодействия [5].

4. Для оценки эксплуатационной надежности объектов МТУ разработана математическая модель определения коэффициента готовности узла к освоению потребных объемов перевозок на расчетный период времени. На рис. 2 представлена топологическая модель Ваннинско-Совгаванского МТУ (ВСМТУ) для расчета его коэффициента готовности, построенная с помощью теории графов.

5. В среде AnyLogic, на основе использования современного опыта моделирования



**Рис. 2.** Топологическая модель мультимодального транспортно узла для расчета коэффициента готовности к освоению потребных объемов перевозок на расчетный период времени

**Fig. 2.** The topological model of the multimodal transport hub for calculating the coefficient of readiness for the development of the required transportation volumes for the estimated period of time

транспортных систем [10–12], создана имитационная модель функционирования и развития ВСМТУ [13] для формирования исходного множества проектных альтернатив (ИМПА) изменения облика и мощности МТУ. На рис. 3 представлена расчетная схема модели.

В качестве математической основы методики оценки проектных альтернатив при имитационном моделировании функционирования и развития МТУ были использованы разработанные теоретико-множественные модели МТУ, модель определения коэффициента готовности МТУ к освоению потребных объемов перевозок на расчетный период времени и топологическая модель ВСМТУ.

Имитационная модель позволила исследовать взаимодействие объектов железнодорожного и морского транспорта, оценить влияние на их эксплуатационную надежность стохастических факторов, изучить закономерности функционирования и развития такой сложной транспортной системы, как МТУ, определить сбалансированные значения технических и технологических параметров, при которых система сможет бесперебойно работать в условиях возрастания вагонопотока, а также мероприятия поэтапного увеличения мощности объектов МТУ для пропуска перспективного грузопотока.

6. Сформулирована содержательная постановка задачи формирования области эффек-

тивных проектных альтернатив (ОЭПА) поэтапного развития мультимодального транспортного узла, разработаны ее математическая модель и методика решения, позволяющая в исходном множестве проектных альтернатив найти ОЭПА для принятия проектных решений по изменению облика и мощности МТУ при заданных ограничениях и условиях эффективности.

Задача формирования ОЭПА развития МТУ относится к многокритериальным недетерминированным динамическим задачам [14–16], так как используемые для оценки проектных альтернатив критерии зависят от времени и случайных величин. При решении такого рода задач небольшой размерности широко применяется метод динамического программирования [15–19], в котором для поиска оптимума используется направленный последовательный перебор вариантов. Для задач с большой размерностью использование данного метода затруднительно. В этом случае исходную задачу посредством декомпозиции делят на частные. Например, применив метод статических сечений [20, 21], задачу принятия проектных решений по развитию МТУ можно разбить на частные задачи по годам расчетного периода. Из найденных частных решений по статическим сечениям с помощью метода динамического программирования получают общее решение исходной задачи.

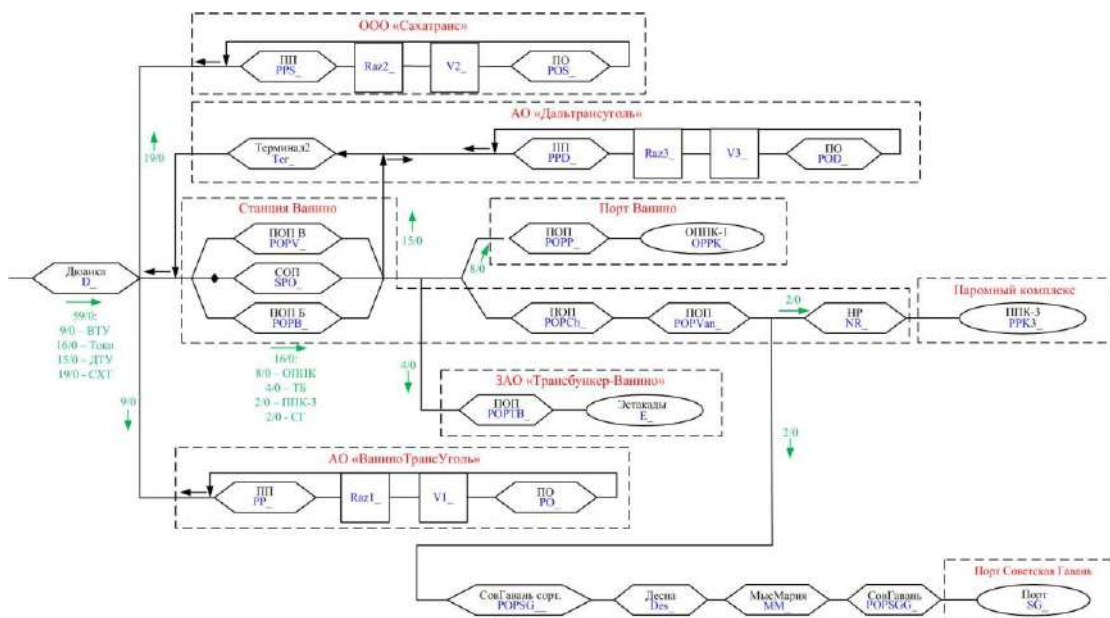


Рис. 3. Расчетная схема имитационной модели функционирования и развития Ванинско-Совгаванского мультимодального транспортного узла

Fig. 3. Calculation scheme of functioning and development simulation model of the Vanino-Sovgavan' multimodal transport hub

Для решения рассматриваемой задачи применим декомпозицию и модифицированный метод динамического программирования – обобщенный алгоритм Кеттеля [22, 23], с помощью которых формируется полное множество Парето-оптимальных решений (область эффективных проектных альтернатив). ОЭПА представляет собой доминирующую последовательность проектных альтернатив (ДППА), из которой лицо, принимающее решения (ЛПР), выбирает оптимальный комплексный план развития МТУ. Использование данного метода существенно сокращает число рассматриваемых проектных альтернатив, так как декомпозиция исходной задачи на частные в сочетании с направленным последовательным перебором вариантов позволяет исключить неконкурентоспособные продолжения изменения облика и мощности МТУ.

7. Выполнена апробация методики принятия проектных решений по изменению облика и мощности МТУ на примере ВСМТУ.

### Результаты и их обсуждение

Содержательная постановка задачи формирования ОЭПА по этапному развитию МТУ:

Дано:

- грузопотоки по годам расчетного периода;
- возможные инфраструктурные и организационно-технологические мероприятия по изменению облика и мощности объектов МТУ;
- технико-эксплуатационные и экономические показатели ССП и алгоритмы их расчета;
- заданные значения целевых технико-эксплуатационных и экономических показателей ССП;
- объемы привлекаемых инвестиций по годам расчетного периода.

Требуется сформировать область эффективных проектных альтернатив развития МТУ, обеспечивающих поэтапное выполнение заданных целевых показателей в пределах распределенного во времени объема привлеченных инвестиций.

Методика формирования ОЭПА включает в себя три основных этапа:

1. Формирование ИМПА изменения облика и мощности объектов МТУ с помощью его имитационной модели.
2. Проверка ИМПА на допустимость и формирование допустимого множества проек-

ных альтернатив (ДМПА) развития объектов МТУ. Для этого посредством экспертной оценки из ИМПА исключаются альтернативы, реализация которых невозможна или может быть ограничена из-за территориальных, экологических, социальных, технологических, правовых, геополитических и других факторов.

Например, недопустимые альтернативы отсеиваются экспертом, так как не могут быть реализованы по причине невозможности развития объектов МТУ на существующей площадке из-за отсутствия резерва территории или из-за расположения в черте города или охраняемой природной территории.

3. Формирование из ДМПА развития объектов МТУ области эффективных проектных альтернатив – основы для принятия проектных решений по изменению облика и мощности МТУ, обеспечивающих поэтапное выполнение заданных целевых показателей с учетом распределенного во времени объема привлеченных инвестиций.

Алгоритм формирования ОЭПА следующий:

1. По каждому объекту МТУ на основе ДМПА строится доминирующая последовательность Парето-оптимальных проектных альтернатив изменения его облика и мощности.
2. Из доминирующих последовательностей проектных альтернатив изменения облика и мощности объектов МТУ формируются ДМПА развития МТУ с учетом выполнения условия неперевышения объемов привлекаемых инвестиций.

3. На основе ДМПА развития МТУ строится ДППА изменения облика и мощности МТУ.

4. С учетом заданных значений целевых технико-эксплуатационных и экономических показателей ССП из ДППА изменения облика и мощности МТУ выделяется ОЭПА развития МТУ, которую ЛПР использует для выбора эффективного варианта, удовлетворяющего заданным ограничениям.

В связи с декомпозицией задачи поэтапного развития МТУ на частные в качестве критериев оптимальности применяются только аддитивные или мультипликативные показатели ССП:

- провозная, пропускная и перерабатывающая способности объектов узла;
- народнохозяйственная эффективность;
- отраслевая эффективность;
- коэффициент готовности МТУ к освое-

нию потребного объема перевозок;

- время нахождения грузов в МТУ;
- время нахождения подвижного состава (вагонов, локомотивов) и судов в МТУ;
- суммарное время задержки доставки грузов из-за отказов в работе объектов МТУ;
- количество поездов, временно отставленных от движения [7].

ДППА изменения облика и мощности объектов МТУ строятся по затратам на реализацию проектных альтернатив, показателю мощности (провозной, пропускной или перерабатывающей способностям) и коэффициенту готовности МТУ к освоению потребного объема перевозок.

При построении ДППА изменения облика и мощности МТУ ее длина может быть очень значительна. В этом случае для сокращения ДППА применяют дополнительные показатели ССП для отсеивания проектных альтерна-

тив, например, суммарное время задержки доставки грузов из-за отказов в работе объектов МТУ или количество поездов, временно отставленных от движения.

После формирования ОЭПА развития МТУ перед ЛПР ставится задача выбора наилучшей проектной альтернативы из множества конкурентоспособных вариантов. Возможны две постановки данной задачи:

- найти такую проектную альтернативу изменения облика и мощности МТУ, которая при заданном объеме инвестиций обеспечит максимальную эффективность по показателям ССП;
- найти такую проектную альтернативу изменения облика и мощности МТУ, которая обеспечит достижение заданных целевых показателей при минимальном объеме инвестиций.

ЛПР в работе с ОЭПА развития МТУ может использовать такой инструмент ССП, как «приборная панель» ЛПР (рис. 4), которая

Приоритет	Показатели Наименование	Заданные условия		Стратегии развития МТУ						
		min	max	23	22	21	...	10	...	
1	Инвестиции в развитие МТУ, млрд руб.		53	52,362	45,244	40,565			29,720	
2	Народнохозяйственная эффективность, млрд руб.	85		87,435	86,881	80,77			60,96	
3	Отраслевая эффективность, млрд руб.	60		60,827	58,791	57,35			40,76	
4	Коэффициент готовности МТУ к освоению потребного объема перевозок	0,950		0,981	0,980	0,977			0,968	
5	Время нахождения грузов в МТУ, часы		35	19,5	22,3	27,4			34,5	
6	Суммарное время задержки доставки грузов из-за отказов в работе объектов МТУ, часы		150	69,3	78,9	122,4			146,1	
7	Время нахождения вагонов в МТУ, часы		25	12,2	14,3	17,6			24,4	
8	Количество поездов, временно отставленных от движения		1200	445	559	724			1096	

Рис. 4. «Приборная панель» для лица, принимающего решение

Fig. 4. The «dashboard» of the decision-maker

включает в себя показатели ССП, упорядоченные по приоритету, их целевые значения (максимум или минимум) и значения по проектным альтернативам.

### Заключение

Стабильная тенденция роста экспортных перевозок топливно-энергетических грузов в направлении портов тихоокеанского побережья Дальнего Востока Российской Федерации требует значительного усиления мощности транспортной инфраструктуры Восточного полигона, особенно в нынешней геополитической ситуации. В этой связи особую актуальность приобре-

тает задача эффективного использования существующих резервов провозной и пропускной способностей объектов железнодорожного и морского транспорта, их комплексного развития на основе сбалансированности параметров, определяющих мощность железнодорожной и морской портовой инфраструктуры. Разработанная методика позволяет сформировать область эффективных проектных альтернатив развития МТУ для принятия решений по изменению облика и мощности его объектов с учетом их взаимодействия и надежности функционирования.

### Список литературы

1. Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 13.02.2019 г. № 207-р (ред. 30.09.2022). Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс в локал. сети.
2. Об утверждении формы внутренней статистической отчетности ДО-5ВЦ «Отчет о наличии задержанных в движении составов грузовых поездов и вагонов в них» : распоряжение ОАО «РЖД» от 04.09.2012 № 1764р (ред. 19.09.2018). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
3. Регламент взаимодействия между региональными подразделениями функциональных филиалов ОАО «РЖД» при организации вынужденного временного отставления от движения грузовых поездов, следующих на припортовые железнодорожные станции и пограничные переходы Дальневосточной железной дороги : утв. и.о. начальника Дальневосточной железной дороги от 21.10.2019 №ДВОСТ-702/пд.
4. Методологические основы проектирования этапного развития облика и мощности мультимодальной транспортной сети / С.М. Гончарук, В.А. Анисимов, Н.С. Нестерова и др. Хабаровск : ДВГУПС, 2012. 227 с.
5. Анисимов В.А., Нечипорук М.В. Модель взаимодействия железнодорожного и морского транспорта для повышения эффективности мультимодальных перевозок // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. 2014. № 3 (40). С. 9–15.
6. Нестерова Н.С. Методология проектирования мультимодальной транспортной сети : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2017. 387 с.
7. Нечипорук М.В., Анисимов В.А. К вопросу использования сбалансированной системы показателей при моделировании взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в мультимодальном транспортном узле // Транспорт Урала. 2014. №3 (42). С. 13–17.
8. Козлов И.Т. Пропускная способность транспортных систем. М. : Транспорт, 1985. 214 с.
9. Грунтов П.С. Эксплуатационная надежность станций. М. : Транспорт, 1986. 247 с.
10. Макромоделирование транспортных узлов / П.А. Козлов, Н.А. Тушин, В.Ю. Пермикин и др. // Железнодорожный транспорт. 2015. № 10. С. 38–40.
11. Многоподходное имитационное моделирование // AnyLogic : сайт. URL: <https://www.anylogic.ru/use-of-simulation/multimethod-modeling/> (Дата обращения 10.10.2023).
12. Король Р.Г., Балалаев А.С. Имитационное моделирование системы «Железнодорожная станция – морской порт» на примере Владивостокского транспортного узла // Вестн. гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 3 (31). С. 209–216.
13. Нечипорук М.В., Анисимов В.А. Имитационное моделирование развития Ванино-Совгаванского мультимодального транспортного узла // Бюл. результатов науч. исслед. 2022. № 3. С. 73–88.
14. Гавриленков А.В. Основы теории принятия решений в проектировании железных дорог : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1989. 375 с.
15. Изыскания и проектирование железных дорог / И.В. Турбин, А.В. Гавриленков, И.И. Кантор и др. М. : Транспорт, 1989. 478 с.
16. Подвербный В.А. Принятие решений в многокритериальных недетерминированных задачах проектирования железных дорог : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2001. 420 с.
17. Ефименко Ю.И. Обоснование этапности развития железнодорожных станций и узлов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб, 1992. 50 с.
18. Макарович А.М., Дьяков Ю.В. Использование и развитие пропускной способности железных дорог. М. : Транспорт, 1981. 287 с.
19. Турбин И.В. Развитие метода формирования оптимальных схем овладения перевозками // Совершенствование проектирования трассы железных дорог : межвуз. сб. науч. тр. М., 1984. Вып. 750. С. 3–7.
20. Лившиц В.Н. Выбор оптимальных решений в технико-экономических расчетах. М. : Экономика, 1971. 254 с.

21. Васильева Е.М., Левит Б.Ю., Лившиц В.Н. Нелинейные транспортные задачи на сетях. М. : Финансы и статистика, 1981. 104 с.
22. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. М. : Советское Радио, 1969. 488 с.
23. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. М. : Наука, 1984. 327 с.

### References

1. Strategiya prostranstvennogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2025 goda : utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 13.02.2019 g. № 207-r (red. 30.09.2022) [Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2025: approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated February 13, 2019 No 207-r (ed. September 30, 2022)].
2. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 04.09.2012 № 1764r «Ob utverzhdenii formy vnutrennei statisticheskoi otchetnosti DO-5VTs «Otchet o nalichii zaderzhannykh v prodvizhenii sostavov gruzovykh poezdov i vagonov v nikh» (red. 19.09.2018) [Order of JSC «Russian Railways» dated September 4, 2012 No. 1764r «On approval of the DO-5VC internal statistical reporting form «Report on the presence of freight Trains and wagons in Them detained in the Promotion» (ed. September 19, 2018)].
3. Reglament vzaimodeistviya mezhdru regional'nymi podrazdeleniyami funktsional'nykh filialov OAO «RZhD» pri organizatsii vyzhdennoogo vremennogo otstavleniya ot dvizheniya gruzovykh poezdov, sleduyushchikh na priportovye zheleznodorozhnye stantsii i pogranichnye perekhody Dal'nevostochnoi zheleznoi dorogi: utv. i.o. nachal'nika Dal'nevostochnoi zheleznoi dorogi ot 21.10.2019 №DVOST-702/pd [Regulations of interaction between regional divisions of functional branches of JSC «Russian Railways» in the organization of forced temporary suspension from the movement of freight trains going to port railway stations and border crossings of the Far Eastern Railway: approved by the Head of the Far Eastern Railway dated October 21, 2019 No DVOST-702/pd].
4. Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Nesterova N.S., Lebedeva N.A. Metodologicheskie osnovy proektirovaniya etapnogo razvitiya oblika i moshchnosti mul'timodal'noi transportnoi seti [Methodological foundations of the design of the stage-by-stage development of the appearance and capacity of a multimodal transport network]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2012. 227 p.
5. Anisimov V.A., Nechiporuk M.V. Model' vzaimodeistviya zheleznodorozhnogo i morskogo transporta dlya povysheniya effektivnosti mul'timodal'nykh perevozok [A model of interaction between railway and sea transport to increase efficiency-news of multimodal transportation]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Petersburg Transport University], 2014, no. 3 (40), pp. 9–15.
6. Nesterova N.S. Metodologiya proektirovaniya mul'timodal'noi transportnoi seti [Methodology of multimodal transport network design]. Doctor's thesis. Saint Peterburg, 2017. 387 p.
7. Nechiporuk M.V., Anisimov V.A. K voprosu ispol'zovaniya sbalansirovannoi sistemy pokazatelei pri modelirovanii vzaimodeistviya zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v mul'timodal'nom transportnom uzle [On the issue of using a balanced system of indicators in modeling the interaction of rail and sea transport in a multimodal transport hub]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2014, no. 3 (42), pp. 13–17.
8. Kozlov I.T. Propusknaya sposobnost' transportnykh system [Throughput of transport systems]. Moscow: Transport Publ., 1985, 214 p.
9. Gruntov P.S. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' stantsii [Operational reliability of stations]. Moscow: Transport Publ., 1986. 247 p.
10. Kozlov P.A., Tushin N.A., Permikin V.Yu., Slobodyanyuk I.G. Makromodelirovanie transportnykh uzlov [Macro modeling of transport hubs]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2015, no. 10, pp. 38–40.
11. Mnogopodkhodnoe imitatsionnoe modelirovanie (elektronnyi resurs) [Multi-pass simulation modeling (electronic resource)]. Available at: <https://www.anylogic.ru/use-of-simulation/multimethod-modeling/> (Accessed October 10, 2023).
12. Korol' R.G., Balalae A.S. Imitatsionnoe modelirovanie sistemy «Zheleznodorozhnaya stantsiya – morskoi port» na primere Vladivostokskogo transportnogo uzla [Simulation modeling of the Railway station – seaport system on the example of the Vladivostok transport hub]. *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], 2015, no. 3 (31), pp. 209–216.
13. Nechiporuk M.V., Anisimov V.A. Imitatsionnoe modelirovanie razvitiya Vanino-Sovgavanskogo mul'timodal'nogo transportnogo uzla [Simulation modeling of the development of the Vanino-Sovgavan multimodal transport hub]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research], 2022, no. 3, pp. 73–88.
14. Gavrilin A.V. Osnovy teorii prinyatiya reshenii v proektirovanii zheleznykh dorog [Fundamentals of decision-making theory in railway design]. Doctor's thesis. Moscow, 1989. 375 p.
15. Turbin I.V., Gavrilin A.V., Kantor I.I., Yakovlev B.V., Pozin V.A. Izyskaniya i proektirovanie zheleznykh dorog [Railway surveys and design]. Moscow: Transport Publ., 1989. 478 p.
16. Podverbnyi V.A. Prinyatie reshenii v mnogokriterial'nykh nedeterminirovannykh zadachakh proektirovaniya zheleznykh dorog [Decision-making in multi-criteria non-deterministic railway design tasks]. Doctor's thesis. Moscow, 2001. 420 p.
17. Efimenko Yu.I. Obosnovanie etapnosti razvitiya zheleznodorozhnykh stantsii i uzlov [Justification of the stages of development of railway stations and junctions]. Doctor's thesis. Saint Peterburg, 1992. 50 p.
18. Makarochkin A.M., D'yakov Yu.V. Ispol'zovanie i razvitie propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog [The use and development of railway capacity]. Moscow: Transport Publ., 1981. 287 p.
19. Turbin I.V. Razvitie metoda formirovaniya optimal'nykh skhem ovladeniya perevozkami [Development of the method of forming optimal schemes for mastering transportation]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Sovershenstvovanie proektirovaniya trassy zheleznykh dorog»* [Interuniversity proceedings «Improving the design of the railway route»]. Moscow, 1984, iss. 750, pp. 3–7.

20. Livshits V.N. Vybor optimal'nykh reshenii v tekhniko-ekonomicheskikh raschetakh [The choice of optimal solutions in technical and economic calculations]. Moscow: Ekonomika Publ, 1971. 254 p.

21. Vasil'eva E.M., Levit B.Yu., Livshits V.N. Nelineinye transportnye zadachi na setyakh [Nonlinear transport problems on networks]. Moscow: Finansy i statistika Publ., 1981. 104 p.

22. Barlow R. E., Proschan F. Matematicheskaya teoriya nadezhnosti [Mathematical theory of reliability]. Moscow: Sovetskoe Radio Publ., 1969. 488 p.

23. Barlow R.E., Proschan F. Statisticheskaya teoriya nadezhnosti i ispytaniya na bezotkaznost' [Statistical theory of reliability and life testing probability models]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 327 p.

### Информация об авторах

**Нечипорук Марина Викторовна**, старший преподаватель кафедры технологий транспортных процессов и логистики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: miranaforeverrr@mail.ru.

**Анисимов Владимир Александрович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры изысканий и проектирования железных дорог, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: anisvl@mail.ru.

### Information about the authors

**Marina V. Nechiporuk**, Assistant Professor of the Department of Technology of Transport Processes and Logistics, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: miranaforeverrr@mail.ru.

**Vladimir A. Anisimov**, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Railway Research and Design, Saint Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: anisvl@mail.ru.



## Диагностический алгоритм анализа тока асинхронных электродвигателей, основанный на методиках оценки годографа и частотного спектра

А.Э. Бирюков<sup>1</sup>✉, Д.Г. Сорокин<sup>1</sup>, Н.В. Лысов<sup>2</sup>, М.С. Ситников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «Синара Алгоритм», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉BirukovAE@sinara-group.com

### Резюме

В статье рассмотрен диагностический алгоритм для анализа технического состояния асинхронного электродвигателя на основе сигналов потребляемого линейного тока. Цель разработки данного алгоритма – своевременное выявление дефектов асинхронных электродвигателей в режиме их эксплуатации. Проведен литературный обзор по статистике наиболее распространенных неисправностей и методам их диагностики. Среди неисправностей выделяются: обрыв фазы, межвитковое замыкание, замыкание фазы на корпус, дефект ротора и эксцентриситет ротора. Недостатки существующих подходов, основанных на стендовых испытаниях, могут привести к несвоевременной диагностике и, следовательно, развитию нарушений до критического уровня и повреждению смежных с электродвигателем узлов. В связи с этим требуется производить диагностику в режиме эксплуатации, что позволит вовремя предупредить развитие дефектов асинхронного электродвигателя. Методы диагностики можно разделить на четыре типа: анализ тока во временной области, анализ тока при помощи нейронных сетей, анализ тока в частотной области и анализ годографа обобщенного вектора тока. Для разработанного алгоритма были выбраны последние две методики. Они позволяют надежно классифицировать конкретные типы неисправностей, а параллельное их использование повышает робастность системы. Для тестирования работы алгоритма был изготовлен испытательный стенд, а также искусственно воссозданы следующие неисправности: межвитковое замыкание и дефект ротора. После испытаний на стенде и настройки чувствительности срабатывания, алгоритм проходит тестирование на трех электродвигателях реального электропоезда. Данный алгоритм приспособлен для диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, с типом соединения «звезда». Однако в будущем планируется масштабировать его на двигатели с фазным ротором и двигатели, соединенные «треугольником».

### Ключевые слова

асинхронный электродвигатель, диагностика технического состояния, межвитковое замыкание, дефект ротора, годограф тока, спектральный анализ тока

### Для цитирования

Диагностический алгоритм анализа тока асинхронных электродвигателей, основанный на методиках оценки годографа и частотного спектра / А.Э. Бирюков, Д.Г. Сорокин, Н.В. Лысов, М.С. Ситников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 88–101. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).88-101.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 21.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 04.12.2023 г.; принята к публикации: 05.12.2023 г.

## Diagnostic algorithm for analysis of induction motors current based on a hodograph estimation of the generalized current vector and frequency spectra

A.E. Biryukov<sup>1</sup>✉, D.G. Sorokin<sup>1</sup>, N.V. Lysov<sup>2</sup>, M.S. Sitnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LTD «Sinara Algorithm», Moscow, the Russian Federation

<sup>2</sup>Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg, the Russian Federation

✉BirukovAE@sinara-group.com

### Abstract

The article considers a diagnostic algorithm for analyzing the technical condition of an asynchronous electric motor based on the signals of the consumed linear current. The purpose of the development of this algorithm is the timely detection of defects of asynchronous electric motors in their operation mode. A literature review on the statistics of the most common malfunctions and methods of their diagnosis is carried out. These include phase breakage, inter-turn closure, phase closure to the core, rotor defect and rotor eccentricity. The disadvantages of existing approaches based on bench tests can lead to untimely diagnosis and, consequently, the development of a malfunction to a critical level and damage to the nodes adjacent to the electric motor. In this re-

gard, diagnostics in operation mode is required, which will prevent beforehand the development of defects in the asynchronous electric motor. Diagnostic methods can be divided into four types: time domain current analysis, neural network current analysis, frequency domain current analysis, and generalized current vector hodograph analysis. The last two methods were chosen for the developed algorithm. They allow you to reliably classify specific types of faults, and the parallel use of the both increases the robustness of the system. To test the operation of the algorithm, a test bench was made, as well as the following malfunctions were artificially recreated: inter-turn locking and a rotor defect. After testing on the stand and setting the response sensitivity, the algorithm is tested on three electric motors of a real electric train. This algorithm is adapted for the diagnosis of asynchronous motors with a squirrel-cage rotor and the «star» type connection. However, in the future it is planned to scale it on motors with a phase rotor and motors with a «triangle» connection.

### Keywords

induction machine, diagnosis of technical condition, turn-to-turn short circuit, rotor defect, hodograph of current, spectral current analysis

### For citation

Biryukov A.E., Sorokin D.G., Lysov N.V., Sitnikov M.S. Diagnosticheskiy algoritm analiza toka asinkhronnykh ehlektrodvigateli, osnovannyi na metodikakh otsenki godografa i chastotnogo spektra [Diagnostic algorithm for analysis of induction motors current based on a hodograph estimation of the generalized current vector and frequency spectra]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 88–101. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).88-101.

### Article info

Received: October 21, 2023; Revised: December 4, 2023; Accepted: December 5, 2023.

### Введение

Объектом исследования статьи является асинхронный электродвигатель (АД) 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.

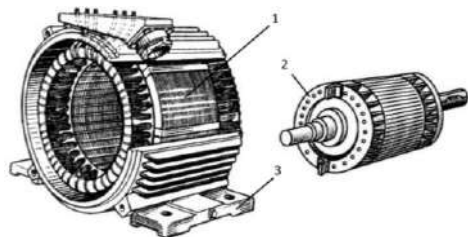
АД используются в составе тяговых приводов электропоездов, электромобилей [4, 5], в качестве генераторов на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях [2, 6] и в другой технике. Ее работоспособность зависит от технического состояния входящего в нее оборудования, включая АД. В эксплуатации они неизбежно выходят из строя и могут ремонтироваться несколько раз в течение своего срока службы. В связи с этим требуется регулярно проводить процедуры технической диагностики. В большинстве случаев для этого используются спе-

циальные стенды, на которые устанавливается двигатель и тестируется в различных режимах с применением датчиков тока, напряжения, температуры, оборотов двигателя и момента. Несмотря на комплексный анализ, данный подход имеет существенные недостатки: остановка оборудования, необходимость переноса двигателя на стенд, а также редкая периодичность процедуры, выполняемая согласно руководству по эксплуатации. Последний недостаток может привести к развитию неисправности до критического уровня и повреждению смежных с электродвигателем узлов. Задача своевременной диагностики электродвигателей в режиме эксплуатации и недопущения развития отказов на данный момент остро стоит в транспортной промышленности. Поэтому в данной работе поставлена цель – разработка алгоритма анализа токов для своевременного обнаружения наиболее распространенных неисправностей АД, работоспособного в эксплуатационном режиме диагностируемого оборудования.

### Конструкция асинхронного электродвигателя

Для понимания причин развития дефектов и методов их диагностики, требуется знать конструкцию АД. Двигатель с короткозамкнутым ротором состоит из трех основных частей (рис. 1): неподвижного статора с трехфазной обмоткой 1, вращающегося ротора с короткозамкнутой обмоткой 2 и станины 3, выполня-

ющей только конструктивные функции [6]. Между статором и ротором находится воздушный зазор, через который осуществляется электромагнитное взаимодействие.



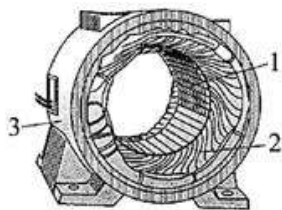
**Рис. 1.** Конструкция асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – станина

**Fig. 1.** Structure of an induction squirrel-cage rotor:

1 – stator; 2 – rotor; 3 – bedplate

Статором также иногда называют всю неподвижную часть, в которую входят сердечник, набранный из листов электротехнической стали, статорной обмотки и станины (рис. 2).



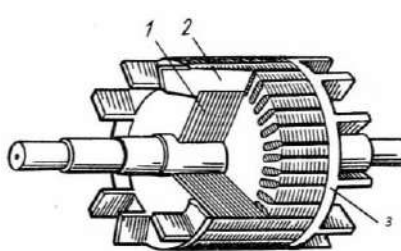
**Рис. 2.** Конструкция статора:

1 – сердечник; 2 – обмотка; 3 – станина

**Fig. 2.** Structure of the stator:

1 – core; 2 – winding; 3 – bedplate

В свою очередь сердечник ротора также собран из листов электротехнической стали, в который укладываются стержни, ограниченные с торцов кольцами ротора (рис. 3). Отсюда и происходит название «короткозамкнутый ротор», поскольку стержни замкнуты накоротко.



**Рис. 3.** Конструкция ротора:

1 – сердечник; 2 – стержни; 3 – кольца

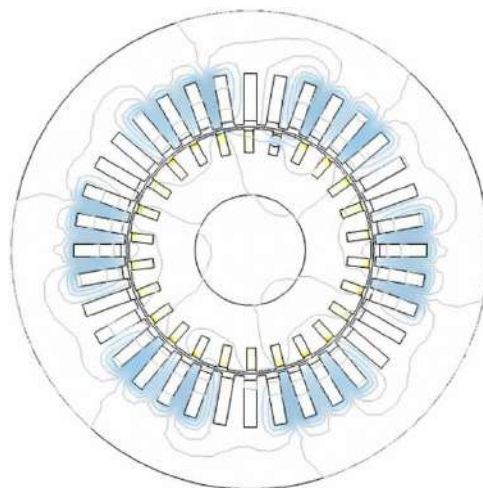
**Fig. 3.** Structure of the rotor:

1 – core; 2 – bars; 3 – rings

Обмотка статора подключается к трехфазному источнику напряжения для создания вращающегося магнитного поля. Изменение магнитного потока через контуры, образованные стержнями ротора, возбуждает в них электродвижущую силу (ЭДС) согласно закону об электромагнитной индукции Фарадея. На рис. 4 представлено характерное распределение магнитного поля в плоскости разреза АД. Темный синий цвет обозначает участки с максимальной магнитной индукцией, оранжево-желтый цвет – участки с максимальной плотностью тока. Количество полюсов зависит от типа подключения обмотки и влияет на скорость вращения поля. Его можно рассчитать по формуле:

$$n_s = 60f_1 / 2p,$$

где  $n_s$  – скорость вращения поля статора;  $f_1$  – частота питающего напряжения;  $2p$  – количество пар полюсов.



**Рис. 4.** Распределение магнитного поля внутри асинхронного двигателя

**Fig. 4.** Distribution of a magnetic field inside the asynchronous motor

Возникающая ЭДС возбуждает ток в стержнях ротора, на который действует сила Ампера со стороны магнитного поля статора. Это приводит ротор во вращение с собственной частотой  $n_r$ . Частота вращения ротора не может совпадать с частотой вращения поля статора в установившемся режиме. Разность между ними определяется частотой скольжения  $n_{slip}$ . Скольжение также может иметь безразмерный вид и вычисляться по формуле:

$$s = 100\% \cdot (n_s - n_r) / n_s.$$

При разгоне скольжение имеет положи-

тельное значение, а при торможении – отрицательное. Таким образом, изменение потока через стержни ротора происходит с частотой скольжения. Из-за малой индуктивности ротора его ток также имеет частоту скольжения. Причина, по которой ротор отстает от поля статора, проста: при совпадении их скоростей вращения, скольжение снизилось бы до нуля и перестал возбуждаться ток в стержнях ротора. В то же время ротор имеет собственное электромагнитное поле, скорость вращения которого совпадает с  $n_s$ , а его вектор направлен перпендикулярно полю статора.

### Дефекты асинхронных электродвигателей

Точной статистической информации по неисправностям АД нет. Эти данные в большинстве случаев являются конфиденциальными и составляют коммерческую тайну эксплуатирующей организации. Тем не менее несколько исследований было проведено с целью определения приближенного значения [7, 8]. Результаты работы [7] приведены на рис. 5.

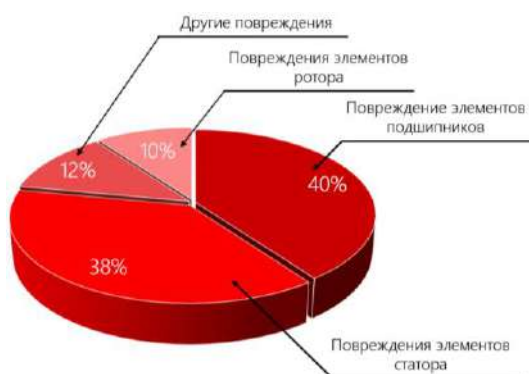


Рис. 5. Статистические данные по неисправностям асинхронных двигателей

Fig. 5. Statistical data on malfunctions of asynchronous motor

Видно, что большинство неисправностей относятся к повреждению подшипников и элементов статора. Поскольку для диагностики подшипников преимущественно используется вибродиагностика, в данной работе их неисправности будут рассмотрены кратко. Более подробную информацию по контролю их технического состояния можно найти в [9, 10]. Часть неисправностей электродвигателей можно условно отнести к критическим, а другие – к некритическим. Первый случай приводит к затратам на ремонт и простоя оборудования;

второй случай не менее серьезен, поскольку последующий плановый ремонт электродвигателя удорожается, а также значительно сокращается срок его службы.

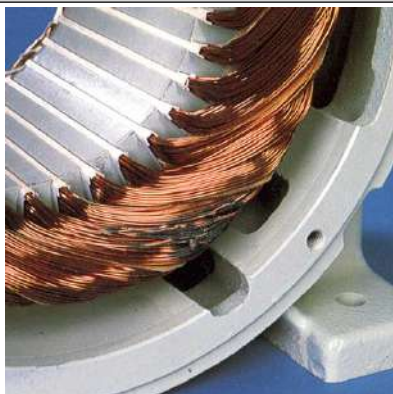
Анализ литературы показал, что среди остальных неисправностей в основном выделяют: обрыв фазы, межвитковое замыкание [9, 11–16], замыкание фазы на корпус, дефект ротора [9, 12–14, 16] и эксцентриситет ротора [17, 18]. Также в [19] приведены подробные методы по контролю изоляции. Снижение сопротивления изоляции приводит к межвитковым замыканиям, а в предельном случае – к короткому замыканию одной из фаз АД на корпус. Это естественный процесс деградации изоляции при отсутствии корректирующих мероприятий. Нарушение температурного режима АД значительно ускоряет этот процесс.

При обрыве фазы нагрузка увеличивается на неповрежденные обмотки двигателя, что показано на рис. 6.



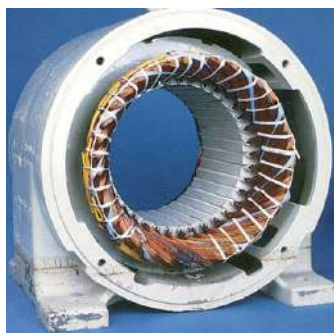
Рис. 6. Обрыв фазы  
Fig. 6. Phase loss

При межвитковом замыкании активное сопротивление обмотки и ее индуктивность изменяются в небольших пределах (рис. 7). Это может долго оставаться скрытым, поскольку не приводит к явным изменениям в работе АД. Однако протекающий в месте замыкания ток со временем разрушает изоляцию и соседних проводов, что может привести к более серьезным последствиям. Межвитковые замыкания могут быть определены при помощи измерения межфазных сопротивлений. В случае повреждения одной обмотки измерительное оборудование покажет одно сниженное межфазное сопротивление при подключении «треугольником», и два сниженных при подключении «звездой».



**Рис. 7.** Межвитковое замыкание  
**Fig. 7.** Turn-to-turn short circuit

При замыкании фазы на корпус значительно снижается индуктивность и сопротивление одной из обмоток. При этом сумма токов, питающих двигатель (линейных токов), перестает быть близкой к нулю. Резко возрастающий при этом ток повреждает изоляцию и сами провода, что требует замены обмотки (рис. 8).



**Рис. 8.** Замыкание фазы на землю  
**Fig. 8.** Phase-to-ground short circuit

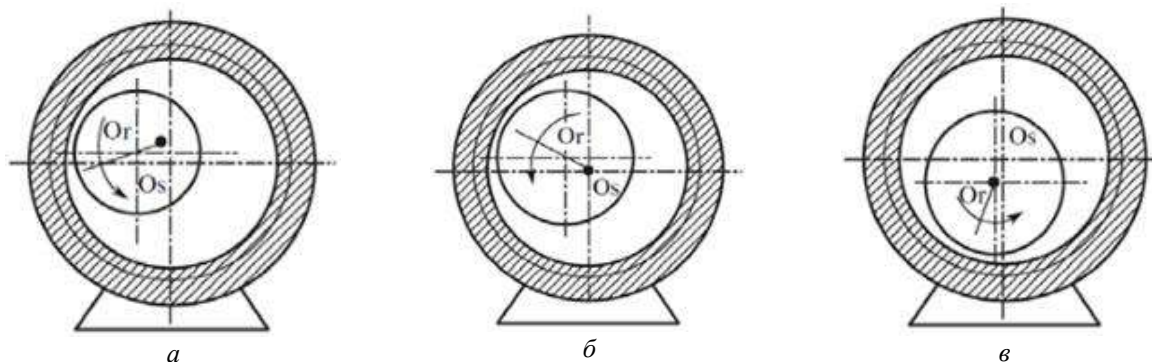
Под дефектом ротора понимается повреждение его стержней. Во время протекания то-

ка они расширяются вследствие нагрева, а после отключения двигателя сжимаются. Подобные циклические нагрузки приводят к излому стержня. Как правило, это происходит во время старта движения, когда стержни еще не нагрелись, и по ним протекает максимальный ток. Под эксцентриситетом ротора понимается смещение оси его вращения. Это приводит к неоднородности магнитного поля в зазоре. Эксцентриситет дополнительно классифицируется на три типа: статический, динамический и смешанный (см. рис. 9).

Существующие методы диагностики технического состояния АД по статорному току можно разделить на четыре типа: анализ тока во временной области, анализ тока в частотной области, анализ годографа обобщенного вектора тока и анализ тока при помощи нейронных сетей.

Нейронные сети находят скрытые признаки изменения статорного тока, поэтому могут быть использованы для определения неочевидных неисправностей. Однако это требует использования большого объема данных для обучения алгоритма. К тому же на данный момент лучше себя показали методы прямого анализа, имеющие под собой конкретное теоретическое обоснование. Возможно, по мере накопления базы признаков конкретных отказов, нейросетевые методы получат большее распространение.

В данной работе будут рассмотрены «прямые» методы диагностики АД. Классическая схема экспериментального стенда приведена на рис. 10. В нее входят датчики линейного тока, потребляемого АД, а также датчик оборотов ротора, о необходимости которого будет сказано позже. Сигналы с датчиков приходят на алгоритмический блок, который осу-



**Рис. 9.** Виды эксцентриситета ротора:  
*a* – статический; *b* – динамический; *c* – смешанный

**Fig. 9.** Types of rotor's eccentricity:  
*a* – static; *b* – dynamic; *c* – mixed

ществляет дискретизацию и анализ.

Как правило, анализ тока во временной области используется для нахождения явных отклонений. Например, при обрыве фазы или замыкании фазы на корпус, фазный ток значительно изменяет свою амплитуду по отношению к другим. Это возможно оценить даже по графику на осциллографе. Неисправности обмотки статора связаны с конкретной фазой, поэтому удобно анализировать электродвигатель, соединенный по типу «звезда», поскольку в нем линейный ток равен фазному. В случае соединения обмоток «треугольником», например, при обрыве одной из фаз линейный ток не будет близким нулю. Тем не менее диагностика АД, соединенного «треугольником» также возможна, хотя и требует учета распределения тока между обмотками.

Наиболее надежными методами считаются анализ линейного тока в частотной области и анализ годографа его обобщенного вектора. В составе транспортных средств, тяговый асинхронный электродвигатель питается, как правило, от частотного регулятора. Он осуществляет регулирование скорости вращения АД в широком диапазоне за счет векторного управления. При этом на вход АД подается широтно-импульсно модулированное (ШИМ) напряжение. Это отражается на частотном спектре тока, в котором появляются более выраженные гармоники основной частоты и пики, связанные с частотами ШИМ. Характерный спектр тока АД при питании от автономного инвертора напряжения (АИН) приведен на рис. 11.

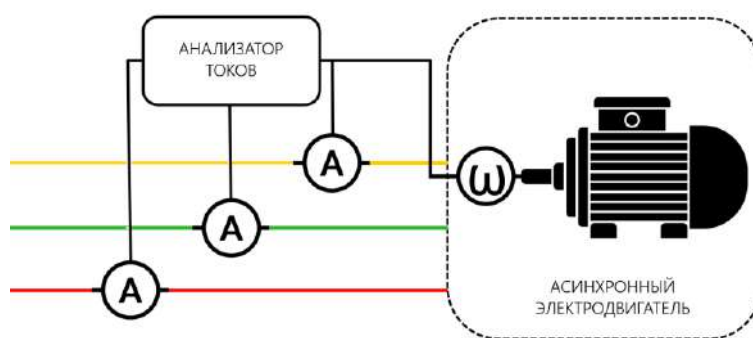


Рис. 10. Классическая схема испытательного стенда  
Fig. 10. Typical scheme of a testing bench

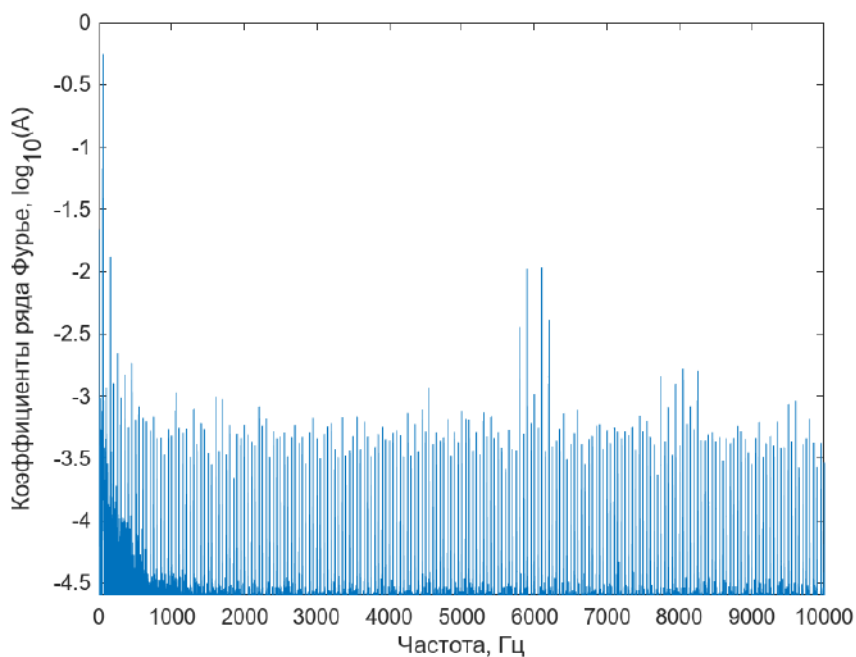


Рис. 11. Характерный спектр тока при питании от автономного инвертора напряжений  
Fig. 11. Typical current spectrum when powered by an autonomous voltage inverter

Наибольший пик соответствует основной частоте напряжения  $f_1$ . В спектре также присутствуют кратные гармоники ( $2f_1, 3f_1, \dots$ ); комбинационные частоты, обусловленные выпрямленным напряжением и пульсациями тока инвертора; высокие частоты ШИМ инвертора; пазовые гармоники (рис. 12), определяемые по формуле:

$$f_{\text{паз}} = f_1 \left( N_R \frac{(1-s)}{2p} \pm k \right),$$

где  $k = 1, 3, 5 \dots$  – порядок гармоник (в основном,  $k = 1$ );  $N_R$  – число пазов ротора и др. Более подробный анализ спектрального состава тока и напряжения на выходе преобразователя частоты приведен в [20].

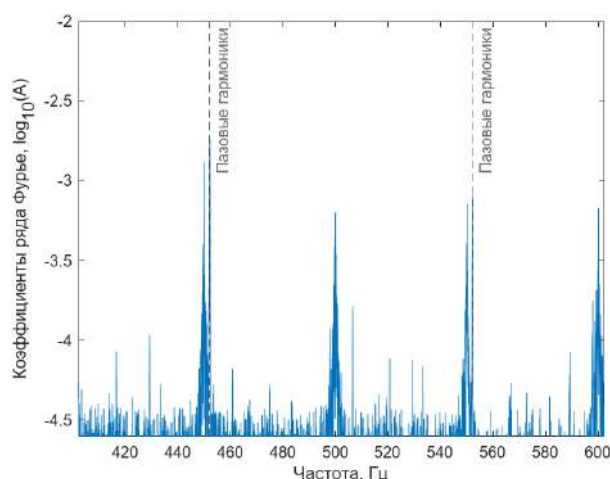


Рис. 12. Пазовые гармоники статорного тока асинхронного двигателя

Fig. 12. Groove harmonics of asynchronous motor stator current

Их наличие в спектре сигнала связано со следующим физическим процессом. Магнитный поток протекает через магнитопровод статора сквозь воздушный зазор между ротором и статором, далее через магнитопровод ротора и возвращается через зазор обратно в статор. Из-за того, что воздух и материал сердечника ротора имеют разные магнитные проницаемости, сопротивление магнитному потоку в зазоре является неоднородным. Оно изменяется при прохождении пазов ротора над пазами статора, что ведет к модуляции главной гармоники тока с частотой  $f_{\text{паз}}$ , зависящей от количества пазов ротора [12].

Более наглядное понятие о пазовых гармониках можно получить при помощи математического моделирования. Для идеализированного двигателя без повреждений, питаемого синусоидальным напряжением, спектр тока будет выглядеть как на рис. 13.

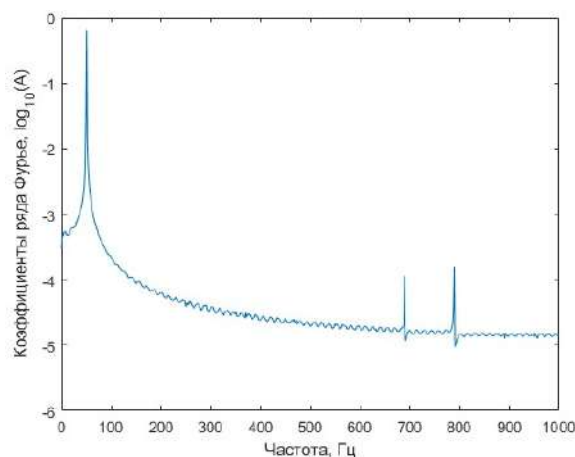


Рис. 13. Спектр идеализированного двигателя

Fig. 13. Frequency spectrum of an idealized motor

Таблица 1. Формулы для расчета частот, соответствующих дефектам

Table 1. Equations for calculation of frequencies in accordance to the defects

Название дефекта Defect name	Формула частот Frequency formula
Дефект ротора Rotor defect	$f_{\text{ротор}} = f_1(1 \pm 2ks)$
Межвитковое замыкание Turn-to-turn short circuit	$f_{\text{МВЗ}} = f_1[k \pm n/p \cdot (1-s)]$
Эксцентриситет ротора Rotor eccentricity	$f_{\text{экс}} = f_1 \left( (n_r N_R \pm n_d) \cdot \frac{(1-s)}{p} \pm n_{\text{вс}} \right)$
Статический эксцентриситет ротора Rotor static eccentricity	$f_{\text{ст. экс.}} = f_1 \cdot (k \pm 1/p)$
Дефект подшипника Bearing defect	$f_{\text{подшипника}} = f_1 \pm kf_v$
Ослабление крепления на фундаменте Loosening of the fastening on the foundation	$f_{\text{крепление}} = f_1 \pm kf_r / 2$

Анализ частотного спектра позволяет однозначно идентифицировать конкретные неисправности, поскольку они по-разному влияют на частотные составляющие тока. В табл. 1 приведены формулы для расчета частот, соответствующих определенным неисправностям АД [12, 17].

В табл. 1 использованы следующие обозначения:  $k, n = 1, 3, \dots$ ;  $n_r, n_d = 0, 1, 2, \dots$  – целые числа (порядок эксцентриситета ( $n_d = 0$  при статическом эксцентриситете));  $n_{ws} = 1, 3, \dots$  – порядок магнитодвижущей силы статора;  $f_v$  – характеристическая частота подшипника;  $f_r$  – частота вращения ротора в Гц.

Амплитуда тока в каждой из обмоток является проекцией обобщенного вектора тока. Диаграмма этого вращающегося вектора называется годографом тока. Для его построения удобнее перейти от трехфазной системы координат в двусосную систему. В разной литературе используются различные обозначения этих осей:  $I_{qs}^S, I_{ds}^S$  в [4],  $I_d, I_q$  в [9] или  $I_\alpha, I_\beta$  в [21]. Последний вариант является более распространенным и поэтому предпочтительным. Для перехода к осям  $\alpha$  и  $\beta$  используется преобразование Кларка по следующей формуле:

$$\begin{cases} I_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}}I_A - \sqrt{\frac{1}{6}}I_B - \sqrt{\frac{1}{6}}I_C; \\ I_\beta = \sqrt{\frac{1}{2}}I_B - \sqrt{\frac{1}{2}}I_C, \end{cases}$$

где  $I_A, I_B, I_C$  – измеренные линейные токи.

Характерный вид годографа двигателя без повреждений приведен на рис. 14. Его форма симметрична, что свидетельствует о балансе линейных токов, а амплитуда почти неизменна.

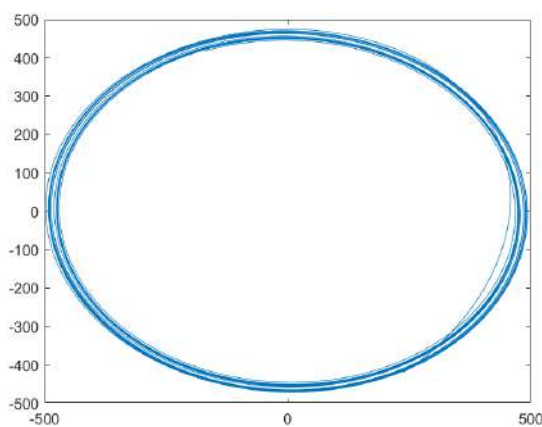


Рис. 14. Годограф электродвигателя без повреждений  
Fig. 14. The hodograph of the electric motor with no damage

Такие критические дефекты как обрыв фазы или замыкание фазы на корпус легко отследить по годографу, поскольку они значительно изменяют баланс токов. Форма годографа демонстрирует изменение магнитного поля во времени. Обрыв фазы приведет к тому, что поле станет пульсирующим: окружность вырождается в отрезок, а замыкание фазы на корпус сделает окружность эллипсом.

### Разработка и испытания диагностического алгоритма

К разрабатываемому диагностическому алгоритму предъявляется несколько требований. Он должен точно определять развитие неисправности во время эксплуатации АД с достаточным быстродействием для принятия решений по дальнейшему использованию оборудования. Также алгоритм не должен быть слишком чувствителен, что увеличит риск ложных срабатываний. Дополнительно не должны анализироваться заведомо некорректные данные, что может произойти, например, вследствие отказа одного из токовых датчиков. Для соответствия всем перечисленным требованиям было принято решение о параллельном использовании нескольких методик диагностики и срабатывания только при выполнении условий каждой из них.

Основной сложностью в диагностике в режиме эксплуатации является изменение частоты вращения АД в широком диапазоне, а также изменение коэффициента кратности коммутации инвертора. Первая особенность приводит к тому, что анализ частотного спектра становится невозможным: пики, соответствующие неисправностям, проявляются на интервале частот. Вторая особенность может проявляться во внесении дополнительных возмущений в спектр. Годограф также может изменять свою форму в зависимости от частоты питающего напряжения, поскольку АИН не только меняет амплитуду напряжения, но и вид модуляции. Для этого алгоритм был настроен на поиск участка постоянной скорости. При отсутствии подобного, алгоритм ищет участок разгона в интервале постоянной амплитуды тока. Это позволяет произвести диагностику очевидных неисправностей, а также анализ годографа. В табл. 2 перечислены методики, которые используются в алгоритме для конкретных дефектов. Дополнительно осуществляется анализ на адекватность загрузки



мых данных, основанный на известном диапазоне амплитуды тока для диагностируемого электродвигателя.

Тестирование алгоритма было произведено на испытательном стенде, приведенном на

рис. 15. В состав стенда входят: АИН, двигатель, генератор, блок питания, три токовых датчика, датчик оборотов и плата аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

**Таблица 2.** Методики, используемые для диагностики дефектов  
**Table 2.** Techniques used for diagnosis of the defects

Дефект Defect	Участок диагностики Diagnostic area	Используемые методики Techniques used
Обрыв фазы Phase loss	Весь интервал записи Entire recording interval	Анализ во временной области Time domain analysis
Замыкание фазы на корпус Phase-to-boxing short circuit		
Межвитковое замыкание Turn-to-turn short circuit	Участок постоянной скорости Constant speed section	Анализ в частотной области Frequency domain analysis
	Весь интервал записи Entire recording interval	Анализ годографа Hodograph analysis
Дефект ротора Rotor defect	Участок постоянной скорости Constant speed section	Анализ во временной области Time domain analysis
	Участок разгона Acceleration section	Анализ в частотной области Frequency domain analysis
Эксцентриситет ротора Rotor eccentricity	Участок постоянной скорости Constant speed section	Анализ годографа Hodograph analysis
	Участок постоянной скорости Constant speed section	Анализ в частотной области Frequency domain analysis

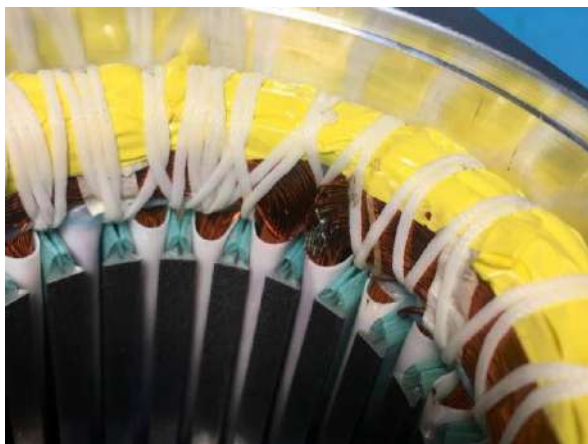


**Рис. 15.** Стенд для тестирования алгоритма  
**Fig. 15.** Setup for testing the algorithm

Объектом испытания были выбраны асинхронные электродвигатели 5IK60W-S2 мощностью 60 Вт. Три двигателя выступали в качестве тестируемых, а один как генератор, подключенный к резистивной нагрузке. Нагружаемым двигателям были присвоены номера 1,

2 и 3. Двигатели № 1 и 3 разобрали при помощи гидравлического пресса для имитации распространенных неисправностей. У двигателя № 1 были пропилены четыре стержня ротора, а у двигателя № 3 – нарушена изоляция и спаяны соседние витки (рис. 16). Измеренные межфаз-

ные сопротивления двигателя № 3 равны 68, 64 и 68 Ом, в то время как у двигателей № 2 и 3 каждое равно 70 Ом.



**Рис. 16.** Межвитковое замыкание на двигателе №3  
**Fig. 16.** Turn-to-turn short-circuit on the motor №3

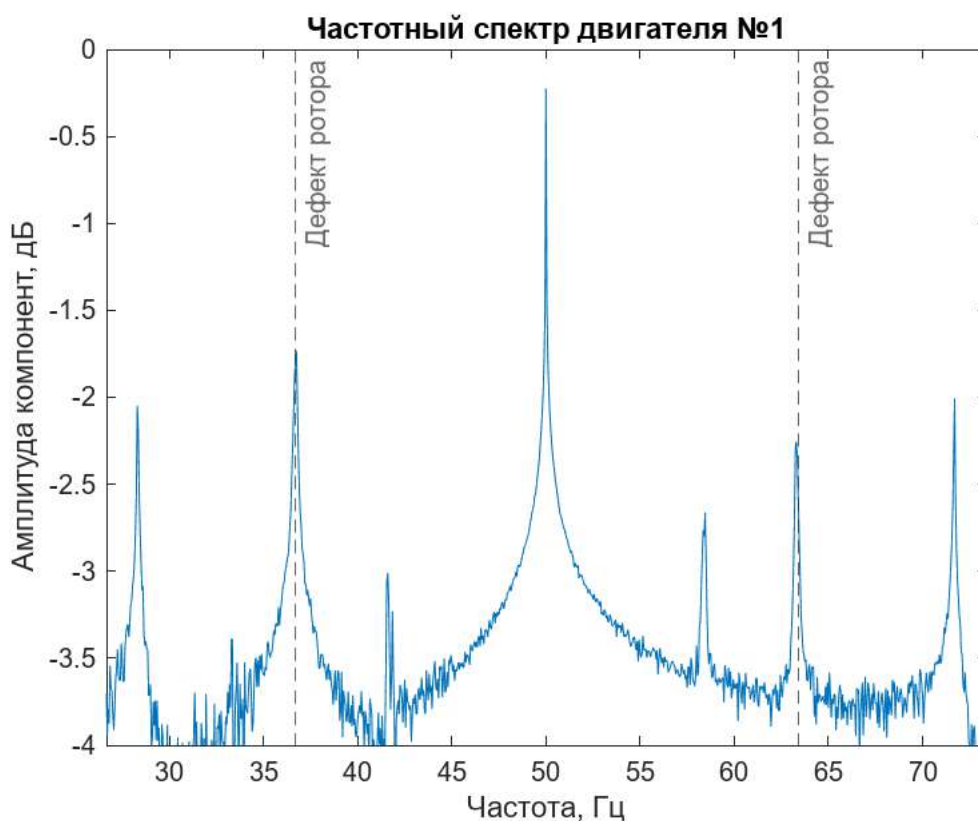
Алгоритм считывает файлы с записанными показаниями датчиков тока и оборотов и выдает результат диагностики по каждой из фаз. Состояние фазы может иметь значения: 0 – без повреждений, 1 – развивающийся дефект; 2 –

развитый дефект. Степень развития дефекта определяется отклонением наблюдаемого параметра от целевого значения.

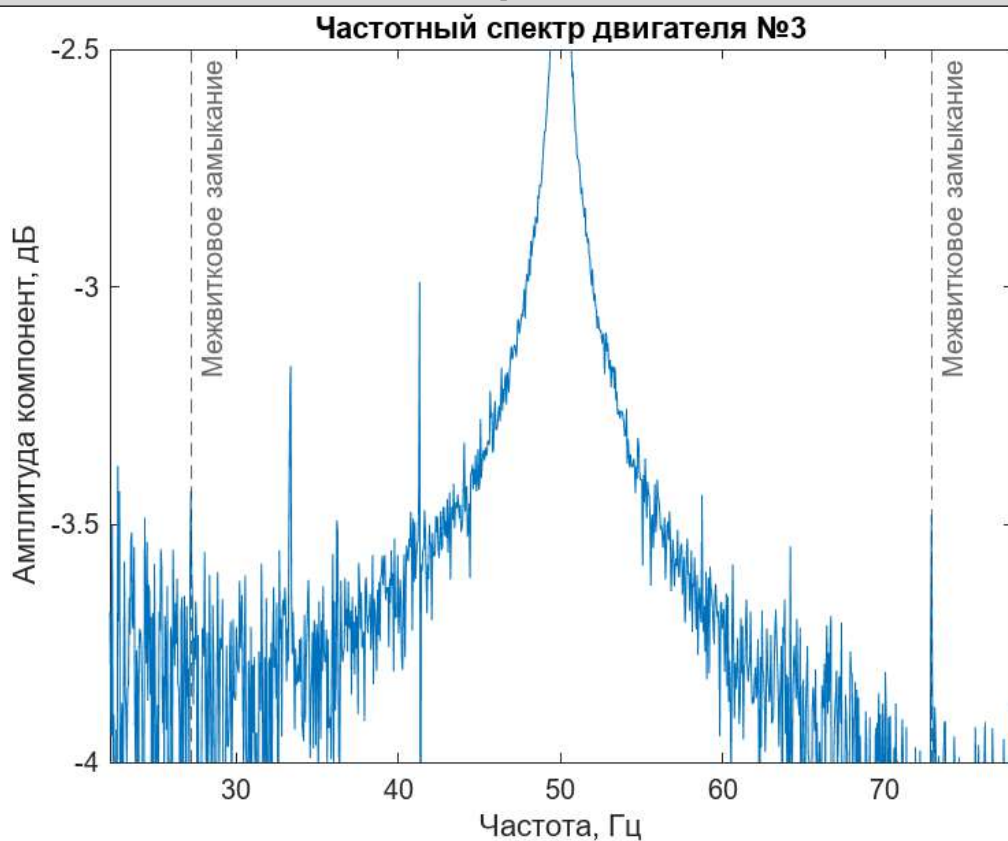
В процессе настройки чувствительности срабатывания были построены графики частотного спектра и годографы. Спектр двигателя № 1 приведен на рис. 17. На данном графике присутствуют явно выраженные пики на частотах, соответствующих дефекту ротора. При его наличии ротор замедляется, когда магнитное поле проходит через сломанный стержень. Поскольку ток по нему не течет, сила Ампера равна нулю. Позже ротор ускоряется, так как скольжение возросло и увеличило силу Ампера, действующую на последующий за сломанным стержень. В связи с этим возникают пики рядом с основной частотой тока, при этом левый пик всегда выше.

На рис. 18 приведен спектр двигателя № 3. Также было подтверждено наличие пиков на соответствующих дефекту частотах.

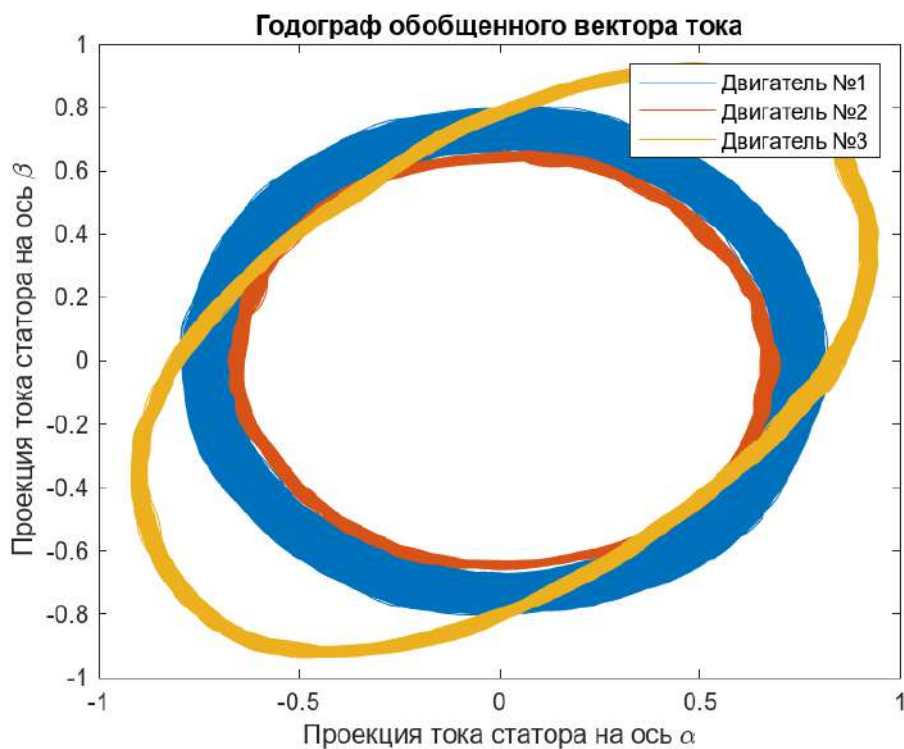
При этом межвитковое замыкание более наглядно определяется по годографу. Сравнение годографов приведено на рис. 19.



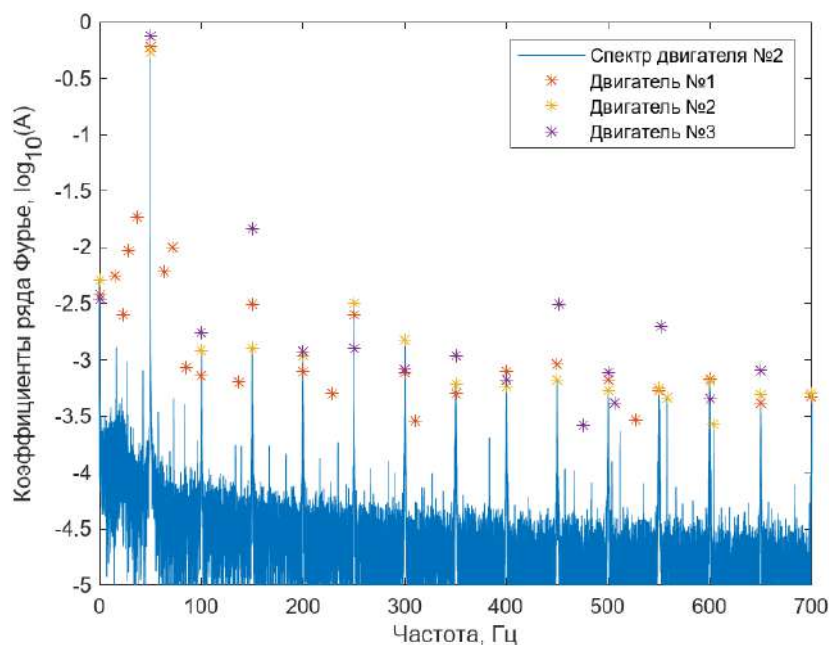
**Рис. 17.** Частотный спектр двигателя №1  
**Fig. 17.** Frequency spectrum of the motor No 1



**Рис. 18.** Частотный спектр двигателя №3  
**Fig. 18.** Frequency spectrum of the motor No 3



**Рис. 19.** Годограф обобщенного вектора тока  
**Fig. 19.** Hodograph of the generalized current vector



**Рис. 20.** Спектр неповрежденного двигателя и амплитуда гармоник основной частоты тока  
**Fig. 20.** Frequency spectrum of the undamaged motor and amplitude of harmonics of the main current frequency

Среди актуальных задач диагностики АД стоит предсказание развития дефектов в будущем, что также называется предиктивной диагностикой. Для этого в данный алгоритм была добавлена функция сохранения амплитуды гармоник основной частоты тока. Это позволяет отслеживать состояние изоляции обмотки и собирать статистику за длительное время работы двигателя. На рис. 20 показаны значения амплитуды на частотах с пиковыми величинами. Видно, что при наличии межвиткового замыкания ощутимо возрастают 3-я, 9-я, 11-я и 13-я гармоники.

Часть маркеров относится к пикам, не связанным с гармониками тока. Также нужно помнить о том, что повышение амплитуды гармоник может быть связано с другими дефектами, например замыканием на корпус.

### Заключение

В данной статье представлен алгоритм анализа тока АД для своевременной диагностики неисправностей. На основе показателя критичности и статистических данных по частоте появления были выбраны следующие дефекты: обрыв фазы, замыкание фазы на корпус, межвитковое замыкание, дефект ротора и эксцентриситет ротора. Разработанный алгоритм позволяет осуществлять диагностику наиболее критичных дефектов на всем участке записи.

Для определения скрытых дефектов используются непродолжительные участки разгона и постоянной скорости, которые позволяют оценивать годограф и спектр тока.

Алгоритм обладает рядом преимуществ. К ним относится параллельное использование двух методик: анализ тока в частотной области и анализ годографа обобщенного вектора тока. Это снижает риск ложного срабатывания и повышает надежность системы, использующей алгоритм. Диагностика производится во время эксплуатации оборудования и не требует переноса АД на специальный стенд. Анализируемые дефекты имеют классификацию по степени развития: 0 (ноль) – нормальное состояние, 1 (один) – развивающийся дефект и 2 (два) – развитый дефект. Это позволяет оператору АД принимать более объективное решение о продолжении использования оборудования. Также вычисляется амплитуда гармоник основной частоты тока, что может быть использовано для предиктивной диагностики и накопления статистических данных о техническом состоянии электродвигателя.

Чувствительность срабатывания, а также адекватность работы алгоритма были настроены при помощи испытательного стенда. На данный момент система, использующая предложенный алгоритм, проходит тестирование на трех тяговых АД реального электропоезда.

## 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. DOI 10.1109/TTE.2017.2703583.
4. Bose B.K. *Modern power electronics & AC drives*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 738 p.
5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высш. шк., 2001. 327 с.
6. Фролов Ю.М. Электрический привод. СПб. : Лань, 2021. 236 с.
7. Прудников А.Э., Боннет В.В., Логинов А.Э. Метод определения эксцентриситета ротора асинхронного двигателя // *Вестник КрасГАУ*. 2015. № 5 (104). С. 68–72.
8. Induction Motor's Bearing Condition Motoring and Diagnosis Applying Cloud Services and Artificial Neural Networks / K. Dambrauskas, J. Vanagas, T. Zimnickas et al. // *7th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*. Liepaja, 2019. P. 1–5. DOI 10.1109/AIEEE48629.2019.8977096
9. Королёв Н.А., Жуковский Ю.Л., Котелева Н.И. Наблюдатель состояния подшипников асинхронного двигателя по компонентам векторов парка тока и напряжения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 2 (55). С. 62–70.
10. An Efficient Hilbert–Huang Transform-Based Bearing Faults Detection in Induction Machines / E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, Y. Amirat et al. // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2017. Vol. 32. Iss. 2. P. 401–413. DOI 10.1109/TEC.2017.2661541.
11. 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.
12. Скляр А.В. О влиянии дефектов электромагнитной системы асинхронного двигателя на пазовые гармоники стартового тока // *Омский научный вестник*. 2016. № 4 (148). С. 109–114.
13. Скляр А.В., Чижма С.Н. Спектральный метод оценки частоты пазовых гармоник асинхронного двигателя // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2017. Т. 60. № 2. С. 21–26.
14. Математическая модель асинхронного двигателя с учетом пазовых гармоник в индукции магнитного поля и неисправностей различного типа / В.В. Харламов, А.В. Скляр, Д.И. Попов и др. // *Омский научный вестник*. 2018. № 4 (160). С. 55–58.
15. Жежеленко И.В., Кривоносос В.Е., Василенко С.В. Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ*. 2021. Т. 64. № 3. С. 202–218.
16. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский и др. // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2014. № 3. С. 34–39.
17. Рогачев В.А. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2008. 19 с.
18. Новожилов А.Н., Крюкова Е.В., Исупова Н.А., Новожилов Т.А., Никитин К.И. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронного двигателя по среднеквадратичной величине дополнительных гармонических токов статора // *Технические науки – от теории к практике*. 2013. № 27-1. С. 132–138.
19. Бабичев А.С. Применение наложенного тока для селективного контроля изоляции группы электродвигателей // *Релейная защита и автоматизация*. 2019. № 2. С. 32–35.
20. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков и др. М. : Транспорт, 1991. 334 с.
21. 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. 10, 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. Bose B.K. *Modern power electronics & AC drives*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 738 p.
5. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001. 327 p.
6. Frolov Yu.M. *Elektricheskii privod* [Electric drive]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2021. 236 p.
7. Prudnikov A.E., Bonnet V.V., Loginov A.E. Metod opredeleniya ekscentrisiteta rotora asinkhronnogo dvigatelya [Method for determining the eccentricity of the rotor of an asynchronous motor]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], 2015, no. 5 (140), pp. 68–72.
8. Dambrauskas K., Vanagas J., Zimnickas T., Kalvaitis A., Bizimavičius T. Induction Motor's Bearing Condition Motoring and Diagnosis Applying Cloud Services and Artificial Neural Networks. *7th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*. Liepaja, 2019, pp. 1–5.

9. Korolev N.A., Zhukovskii Yu.L., Koteleva N.I. Nablyudatel' sostoyaniya podshipnikov asinkhronnogo dvigatelya po komponentam vektorov parka toka i napryazheniya [Observer of the state of asynchronous motor bearings by components of current and voltage park vectors]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2022, no. 2 (55), pp. 62–70.

10. Elbouchikhi E., Choqueuse V., Amirat Y., Benbouzid M. E. H., Turri S. An Efficient Hilbert–Huang Transform-Based Bearing Faults Detection in Induction Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, vol. 32, no. 2, pp. 401–413.

11. Solodkii E.M., Sal'nikov S.V., Dadenkov D.A. Diagnostika mezhvitkovogo замыкания обмотки статора асинхронного двигателя на основе анализа траектории вращающегося вектора тока статора [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.

12. Sklyar A.V. O vliyaniy defektov elektromagnitnoi sistemy asinkhronnogo dvigatelya na pazovye garmoniki statornogo toka [On the influence of defects in the electromagnetic system of an asynchronous motor on the groove harmonics of the stator current]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2016, no. 4 (148), pp. 109–114.

13. Sklyar A.V., Chizhma S.N. Spektral'nyi metod otsenki chastoty pazovykh garmonik asinkhronnogo dvigatelya [Spectral method for estimating the frequency of the groove harmonics of an asynchronous motor]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Bulletins of High Educational Organizations. Electromechanics], 2017, vol. 60, no. 2, pp. 21–26.

14. Kharlamov V.V., Sklyar A.V., Popov D.I., Eroshenko A.V. Matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya s uchptom pazovykh garmonik v induksii magnitnogo polya i neispravnosti razlichnogo tipa [Mathematical model of an asynchronous motor taking into account the groove harmonics in magnetic field induction and malfunctions of various types]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2018, no. 4 (160), pp. 55–58.

15. Zhezhenko I.V., Krivonosov V.E., Vasilenko S.V. Kriterii vyyavleniya mezhvitkovykh замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя [Criteria for detecting inter-turn closures in stator windings using vector analysis of phase currents of an electric motor]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG* [Energy. Bulletins of higher educational organizations and energy associations of the Commonwealth of Independent States], 2021, vol. 64, no. 3, pp. 202–218.

16. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Dmitrievskii A.A., Kazakbaev V.M. Diagnostika neispravnosti asinkhronnykh dvigatelei na osnove spektral'nogo analiza tokov statora [Diagnostics of asynchronous motors malfunctions based on spectral analysis of stator currents]. *Energobezopasnost' i ehnergosberezhenie* [Energy security and energy conservation], 2014, no. 3, pp. 34–39.

17. Rogachev V.A. Diagnostirovanie eksstentsiteta 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. Novocherkassk, 2008. 19 p.

18. Novozhilov A.N., Kryukova E.V., Isupova N.A., Novozhilov T.A., Nikitin K.I. Diagnostirovanie eksstentsiteta rotora asinkhronnogo dvigatelya po srednekvadratichnoi velichine dopolnitel'nykh garmonicheskikh tokov statora [Diagnostics of the eccentricity of the rotor of an asynchronous motor by the RMS value of additional harmonic stator currents]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike* [Technical sciences – from theory to practice], 2013, no. 27-1, pp. 132–138.

19. Babichev A.S. Primenenie nalozhennogo toka dlya selektivnogo kontrolya izolyatsii gruppy elektrodvigatelei [Application of superimposed current for selective isolation control of a group of electric motors]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2019, no. 2 (35), pp. 32–35.

20. Rotanov N.A., Kurbasov A.S., Bykov Yu.G., Litovchenko V.V. Elektropodvizhnoi sostav s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [Electric rolling stock with asynchronous traction motors]. Moscow: Transport Publ., 1991. 334 p.

21. 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.

**Лысов Николай Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электрической тяги, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: lysov.nikolay@vsmervice.ru.

**Ситников Михаил Сергеевич**, руководитель направления по науке и развитию, ООО «Синара Алгоритм», г. Москва; e-mail: SitnikovMS@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.

**Nikolai V. Lysov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electric Traction, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: lysov.nikolay@vsmervice.ru.

**Mikhail S. Sitnikov**, Head of the direction of science and development at LTD «Sinara Algorithm», Moscow; e-mail: SitnikovMS@sinara-group.com.

## Оценка эффективности инвестиций в проекты для компаний железнодорожного транспорта

О.О. Гренкевич, А.Д. Калидова✉

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉alexandra\_kd@bk.ru

### Резюме

В статье рассматривается методика выбора целесообразного места расположения железнодорожных путей для выполнения технического осмотра порожних вагонов, направляемых под погрузку. Использование разработанной методики позволит выбирать оптимальное место для проведения работ по технической передаче вагонов под двоянные операции по критерию минимума суммарных эксплуатационных расходов, а также обосновывать затраты на содержание штата осмотровиков вагонов по договору для транспортных компаний ОАО «РЖД». Объект исследований – пункты проведения технической передачи вагонов под двоянные операции; предмет – критерий выбора оптимального местонахождения железнодорожных выставочных путей, заключающийся в минимизации эксплуатационных расходов. Расчет таких расходов по полурейсам при различных значениях учитываемых факторов (параметры путевого развития, количество и масса местных вагонов) произведен на основе имитационного моделирования маневровых передвижений. Методы статистического исследования применялись с целью выявления математических зависимостей и определения влияния изменяемых параметров на изучаемые величины. В результате были получены зависимости эксплуатационных расходов от массы и числа вагонов в маневровом составе, от длины и продольного профиля полурейсов, используемых в перестановке фитинговых платформ для технического осмотра под двоянные операции. Разработанная методика апробирована на реальном железнодорожном объекте. Практическая значимость данного исследования заключается в совершенствовании работы станции путем сокращения простоя местных вагонов, а также оптимизации условий обслуживания грузоотправителей и грузополучателей за счет ускорения доставки грузов.

### Ключевые слова

выставочный путь, технический осмотр, расходные ставки, эксплуатационные расходы, сокращение простоя, ускорение доставки

### Для цитирования

Гренкевич О.О. Оценка эффективности инвестиций в проект для компаний железнодорожного транспорта / О.О. Гренкевич, А.Д. Калидова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 102–111. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).102-111.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 27.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 04.12.2023 г.; принята к публикации: 05.12.2023 г.

## Evaluating the efficiency of investment in a project for railway transport companies

O.O. Grenkevich, A.D. Kalidova✉

Siberian Transport University, Novosibirsk, the Russian Federation

✉alexandra\_kd@bk.ru

### Abstract

The article considers the method of choosing an appropriate location of railway tracks for performing technical inspection of empty wagons sent for loading. The use of the developed methodology will make it possible to choose the optimal place for the technical transfer of wagons for dual operations according to the criterion of the minimum total operating costs, as well as to justify the costs of maintaining the staff of wagon inspectors under the contract for the transport companies of JSC «Russian Railways». The object for research is the points of technical transfer of wagons for dual operations. The subject of the study is the criterion for choosing the optimal location of railway exhibition tracks thus minimizing the operating costs. The calculation of operating costs for half-journeys with different values of factors about the parameters of track development, the number and weight of local wagons was made on the basis of simulation modeling of shunting movements. Statistical research methods were used to identify mathematical dependencies and determine the influence of variable parameters on the studied values. As a result, the dependences were obtained of operating costs on the mass and number of wagons in the shunting train, on the length and longitudinal profile of the rails used in the rearrangement of fitting platforms for technical inspection for dual operations. The developed methodology for selecting the location of the technical transfer of wagons involved in dual operations has been tested on a real railway facility. The practical significance of this study lies in the improvement of the station's operation by reducing the downtime of local wagons, as well as optimizing the

conditions of service for shippers and cargo recipients by accelerating the delivery of goods.

### Keywords

exhibition track, technical inspection, expense rates, operating costs, reduction of downtime, acceleration of delivery

### For citation

Grenkevich O.O., Kalidova A.D. Otsenka effektivnosti investitsii v proekty dlya kompanii zheleznodorozhnogo transporta [Evaluating the efficiency of investment in a project for railway transport companies]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 102–111. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).102-111.

### Article Info

Received: October 27, 2023; Revised: December 4, 2023; Accepted: December 5, 2023.

### Введение

В целях совершенствования ведения договорной работы в ОАО «РЖД» при взаимодействии с контрагентами об оказании услуг в сфере грузовых железнодорожных перевозок разработана и утверждена типовая форма договора. Регламентированы услуги по организации осмотра порожних вагонов, выполняемых силами грузоотправителей (получателей порожних вагонов).

На основании требования на перемещение порожнего грузового вагона с железнодорожных станций общего пользования на пути необщего пользования осуществляется оплата, в том числе и за предоставление железнодорожных путей общего пользования для нахождения на них железнодорожного подвижного состава, не задействованного в перевозочном процессе (на основании актов общей формы ГУ-23 ВЦ, подписанных перевозчиком или владельцем инфраструктуры). При этом оплата производится в соответствии с положениями Федерального закона «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» от 10 января 2003 г. № 18-ФЗ и постановления Правительства Российской Федерации «Об утверждении Правил перемещения порожних грузовых вагонов на железнодорожном транспорте» от 31 октября 2015 г. № 1180.

Утверждена и введена в действие с 1 января 2020 г. методика расчета ставок платы при предоставлении услуг локомотивного комплекса ОАО «РЖД» сторонним организациям. Размер ставок плат определяется на основе экономически обоснованной себестоимости выполнения работ и услуг с учетом допустимого уровня рентабельности.

На сегодняшний день нет методики, применение которой позволит принять решение транспортным компаниям о целесообразности

содержания штата вагонников-осмотрщиков по договору с ОАО «РЖД».

Система взаимодействия путей необщего пользования с железнодорожной станцией примыкания является многофакторным процессом, зависящим от величины путевого развития, особенности технологии работы по подаче (уборке) и технической передаче вагонов, рода грузов и подвижного состава, объемов работы [1–3].

Выставочные пути, на которых выполняются приемо-сдаточные операции, проектируются для временной постановки подаваемых вагонов на погрузочно-выгрузочные пути и временной постановки вагонов, убираемых на станцию, а также для выполнения маневровой работы, связанной с изменением месторасположения вагонов на грузовом фронте или внутри маневрового состава [4–8]. Кроме того, выставочные пути могут использоваться для операций по технической осмотру вагонов, предназначенных под сдвоенные операции.

Пункты технической передачи вагонов под сдвоенные операции предусматривают, когда суточный вагонооборот железнодорожной станции с предприятием составляет более 50 вагонов. Размещают пункты на железнодорожных станциях общего пользования или на промышленных железнодорожных станциях либо непосредственно на местах выполнения погрузочно-разгрузочных работ.

В действующих нормативных источниках не даны рекомендации по выбору варианта местонахождения путей или пунктов для технического осмотра вагонов под сдвоенные операции: на территории станции ОАО «РЖД» (вариант 1), на территории промышленной станции (вариант 2) или в местах непосредственной погрузки вагонов (вариант 3).

Необходимость создания методики выбора оптимального варианта местоположения



пунктов осмотра вагонов, учитывающей основные факторы, влияющие на эффективность того или иного варианта в реальных условиях работы, обусловлена отсутствием технико-экономических обоснований.

Местоположение таких пунктов следует определять путем сравнения суммарных эксплуатационных затрат, связанных с маневровой работой по перестановке вагонов после выгрузки на места проведения работ по технической их передаче (без учета стоимости услуг по техническому обслуживанию подвижного состава) с затратами, связанными с осмотром вагонов при наличии договора на оказание услуг по техническому обслуживанию и текущему ремонту. Целью данной статьи является описание методики для обоснования расходов на содержание штата вагонников-осмотрщиков ОАО «РЖД» для транспортных компаний.

#### **Методика обоснования расходов на содержание штата вагонников-осмотрщиков по договору для транспортных компаний ОАО «РЖД»**

Существующая методика тяговых расчетов [4] позволяет решить широкий круг практических вопросов эффективной эксплуатации железных дорог: определять оптимальную массу состава для конкретной серии локомотива, рассчитывать скорость движения состава, время хода по участку, расход электрической энергии или дизельного топлива. На основании расчетов составляют график движения поездов, определяют пропускную и провозную способности дорог. На действующих линиях теория тяги позволяет найти рациональные режимы вождения поездов на различных железнодорожных участках. В РФ и за рубежом к настоящему времени разработан ряд таких способов, многие из которых уже нашли достаточно широкое практическое применение [9–13].

Для принятия оптимального решения по выбору места проведения технической передачи вагонов под сдвоенные операции используется критерий минимума эксплуатационных расходов на маневровые рейсы, который является обобщающим, поскольку обеспечивает учет ряда других частных критериев, в числе которых и затраты вагоно-часов в процессе маневровых передвижений.

Исходные данные для работы имитационной модели определения эксплуатацион-

ных расходов на маневровую работу методом тяговых расчетов состоят из трех групп: данные о маневровом составе, о маршруте маневрового передвижения, значения ставок единичных норм расходов на измерители маневровой работы.

Внутри первых двух групп данные представляются в следующем виде: количество вагонов в переставляемой группе, длина группы вагонов, масса переставляемой группы. Данные о скоростях движения и продольном профиле пути на маршруте включают в себя: допустимые скорости движения маневрового состава и длины полурейсов.

Описание элементов продольного профиля на маршруте с указанием границ элементов профиля, длины и уклона элементов. Данные первой группы формируются по результатам расчетов первого этапа. Данные второй группы определяются следующим образом: допустимые скорости движения маневрового состава – для случаев нахождения маневрового локомотива в голове и в хвосте состава. Длины полурейсов определяются по масштабному плану соединительных путей, примыкающих горловин, пути стоянки состава; длины и уклоны элементов продольного профиля на маршруте – по продольному профилю участков, входящих в маневровый полурейс.

Определение затрат в имитационной модели производится с использованием системы единичных норм расходов (ЕНР). В ней определяются расходы в зависимости от значительного числа характерных измерителей, что позволяет с наибольшей точностью учесть особенности производства маневровой работы при различных способах формирования. В предлагаемой модели расчет происходит по следующим показателям: механическая работа локомотива, механическая работа сил сопротивления, расход дизельного топлива, бригадо-часы локомотивных бригад, локомотиво-часы, вагоно-часы, локомотиво-километры, вагоно-километры, тонно-километры.

Реализация алгоритма начинается с приема необходимых для имитации исходных данных. Группы данных, описанные выше, вводятся вручную. Сведения о маневровом локомотиве размещаются во внешнем файле. Для представления кривых в виде, удобном для компьютерной обработки, используется метод кусочно-линейной аппроксимации, при этом в файле

сохраняются коэффициенты соответствующих отрезков прямых.

В процессе движения маневрового состава он испытывает действие неуправляемых и управляемых сил, которые могут выступать как в качестве сил сопротивления движению, так и в качестве ускоряющих сил. К неуправляемым силам следует отнести сопротивление движению состава от воздушной среды, а также от трения (в первую очередь между рельсами и гребнями колес), а также силу тяжести, которая зависит от массы состава с локомотивом и уклонов элементов продольного профиля, на которых находится состав на участке смещения. Силы трения всегда препятствуют движению маневрового состава; сила тяжести может как препятствовать увеличению скорости, так и способствовать ему. Управляемые силы – сила тяги локомотива и тормозная сила.

В предлагаемой модели имитируется управление движением локомотива с маневровым составом, что позволяет рассчитывать значения измерителей при использовании всех возможных режимов движения маневрового состава: тяга, выбег, торможение. Формирование результатов сеанса имитации заключается в расчете суммарных значений измерителей по всем участкам смещения.

В результате сеанса имитации маневрового передвижения получают значения рассматриваемых измерителей. Величина суммарных эксплуатационных расходов на одно маневровое передвижение определяется путем перемножения заданных расходных ставок на измеритель на соответствующие значения измерителей, полученные в ходе моделирования движения маневрового состава.

Разработанные методика и алгоритмы позволяют на основании реальных данных о структуре местных вагонопотоков, с учетом особенностей продольного профиля и работы маневрового локомотива определять суммарные эксплуатационные расходы на маневровую работу по перестановке составов в различных условиях. Определение времени на маневровые операции выполняется по вариантам с учетом длины полурейса, продольного профиля пути на участке маневрового маршрута, технических характеристиках местных вагонов (масса и длина маневрового состава) и энергетических затрат маневрового локомотива [14–21].

## **Выполнение экспериментальных исследований и обсуждение их результатов**

Расчет эксплуатационных расходов, связанных с различной длиной полурейсов, при разных значениях фактора о параметрах путевого развития и количестве местных вагонов, задействованных под сдвоенные операции, выполнен с использованием имитационного моделирования.

Время на проведение маневровых полурейсов по перестановке порожних составов для выполнения технического осмотра на выставочные пути станции ОАО «РЖД» (вариант 1) и на выставочные пути промышленной станции (вариант 2) определялось с помощью тяговых расчетов и отражено в табл. 1.

При помощи временных значений (см. табл. 1), можно определить суммарные эксплуатационные расходы, связанные с перестановкой вагонов к местам выполнения технической передачи в оперативных условиях (табл. 2). Изменение величины расходных ставок на маневровую работу приведет к необходимости внесения изменений в базовые значения эксплуатационных расходов по полурейсам.

По итогам исследований построены графики, отражающие зависимость эксплуатационных расходов от длины и продольного профиля маневровых полурейсов, от числа и массы вагонов в маневровом составе (рис. 1, 2). Проанализированы различные варианты удаленности расположения пунктов осмотра вагонов в зависимости от числа порожних фитинговых платформ в составе, которые могут быть реализованы при использовании вариантов 1 и 2.

По полученным кривым выполнен расчет статистических показателей для уравнений зависимости эксплуатационных расходов от числа вагонов в маневровом составе и от длины полурейса по условной площадке (табл. 3). По результатам полученных статистических показателей можно сделать вывод, что построенные графики достаточно точно описывают результаты испытаний.

На основе приведенных исследований для выбора оптимального варианта места проведения осмотра вагонов по критерию минимума расходов составлена сводная диаграмма зависимости эксплуатационных расходов от числа вагонов в маневровом составе и от длины полурейса (рис. 3).

Таблица 1. Время выполнения маневровых полурейсов, мин.

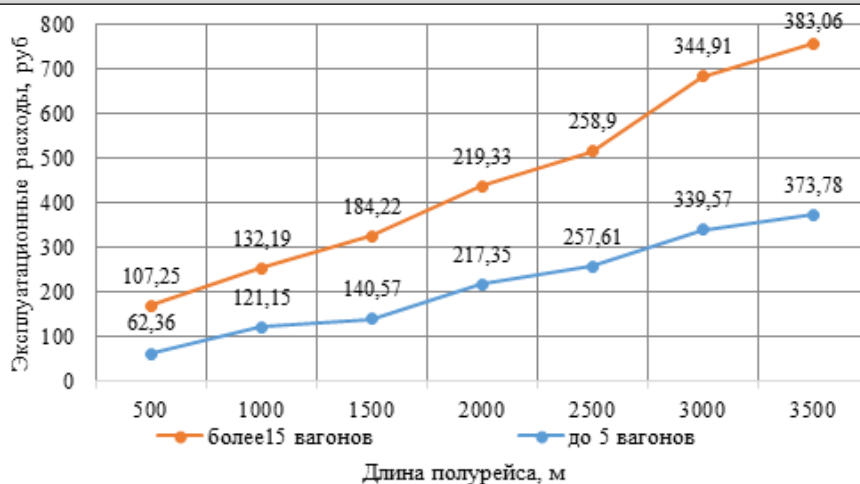
Table 1. Execution time of shunting half-runs, min

Число вагонов Number of wagons	Уклон, ‰ Slope, ‰	Длина полурейса, м half-run length, m						
		500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500
До 5 Under 5	–4	1,81	3,62	5,10	6,81	8,11	10,20	11,72
	–2	1,84	3,71	4,34	6,66	8,00	10,01	11,08
	0	1,75	3,40	4,24	6,10	7,23	9,53	10,49
	2	1,55	2,97	4,14	5,66	6,82	9,01	10,00
	4	1,45	2,90	4,08	5,78	6,18	8,93	9,46
5–10	–4	2,55	3,81	5,40	6,80	8,23	11,05	12,15
	–2	2,28	3,62	5,26	6,52	8,17	10,98	11,10
	0	2,18	3,54	5,03	6,38	7,98	10,90	11,01
	2	2,08	3,30	4,90	5,99	7,69	10,00	10,85
	4	1,95	3,12	4,88	5,56	7,0	09,73	10,15
11–15	–4	2,93	3,45	5,72	6,42	7,59	9,47	12,53
	–2	2,69	3,00	5,12	5,99	7,23	8,85	11,93
	0	2,26	2,96	4,46	5,83	6,99	8,47	11,34
	2	2,12	2,59	4,17	5,43	6,12	8,10	10,86
	4	2,11	2,0	4,02	5,16	6,02	7,75	9,42
Более 15 Over 15	–4	3,99	4,72	7,12	8,29	9,55	10,47	12,25
	–2	3,36	4,2	6,57	7,43	8,03	10,32	12,00
	0	3,01	3,71	5,17	6,15	7,21	9,68	11,47
	2	2,54	3,56	5,0	5,88	6,21	8,44	9,21
	4	2,52	3,01	4,77	5,78	6,12	8,29	9,12

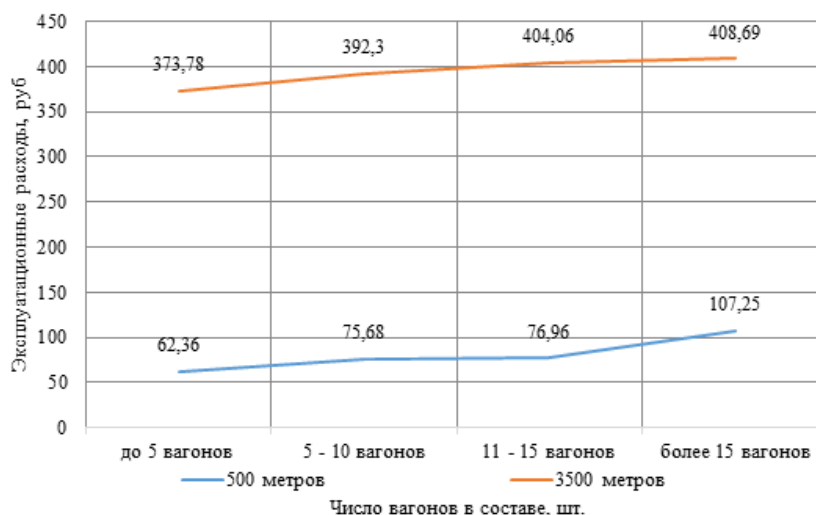
Таблица 2. Информационная база расходов для расчета суммарных эксплуатационных затрат на маневровую работу, руб.

Table 2. Information base of expenses for calculating the total operating costs for maneuvering work, rub

Число вагонов Number of wagons	Уклон, ‰ Slope, ‰	Длина полурейса, м half-run length, m						
		500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500
До 5	–4	64,14	128,98	181,72	242,65	288,97	363,44	417,60
	–2	65,56	132,20	154,65	237,31	285,06	356,68	394,81
	0	62,36	121,15	140,57	217,35	257,61	339,57	373,78
	2	55,23	105,83	147,52	201,68	243,01	321,05	356,33
	4	51,67	103,33	145,38	20,96	220,21	318,20	337,08
5–10	–4	90,86	135,76	192,42	242,30	293,26	393,74	432,93
	–2	81,24	128,99	187,43	232,32	291,12	391,24	395,52
	0	75,68	126,14	179,23	227,33	284,34	388,38	392,30
	2	74,12	117,59	174,60	213,44	274,01	356,33	386,61
	4	69,48	111,17	173,89	198,12	249,43	346,70	361,67
11–15	–4	104,40	122,93	203,82	228,76	270,45	337,44	446,48
	–2	95,85	106,90	182,44	213,44	257,62	315,35	425,10
	0	80,52	105,47	158,92	207,73	249,07	301,80	404,06
	2	75,54	92,29	148,59	193,48	218,07	288,62	386,97
	4	75,18	71,27	143,24	183,86	214,51	276,15	335,66
Более 15	–4	142,17	168,19	253,70	295,39	340,29	373,07	436,50
	–2	119,73	149,66	234,11	264,75	286,13	367,73	427,59
	0	107,25	132,19	184,22	219,13	258,90	344,91	408,69
	2	90,51	126,85	178,16	209,52	221,28	300,74	328,18
	4	89,79	107,25	169,97	205,96	218,07	295,39	324,97



**Рис. 1.** Зависимость эксплуатационных расходов от длины полурейса при движении по условной площадке  
**Fig. 1.** Dependence of operating costs on the length of the half-trip when moving on a conditional platform



**Рис. 2.** Зависимость эксплуатационных расходов от числа вагонов в маневровом составе при движении по условной площадке  
**Fig. 2.** Dependence of operating costs on the number of wagons in the shunting train when moving on a conditional platform

Корреляционный анализ состоит в определении степени связи между величинами, каждая из которых является случайной. В качестве меры оценки такой связи используется коэффициент корреляции  $r$ . По форме корреляционная связь может быть прямолинейной или криволинейной. По направлению корреляционная связь может быть положительной (прямой) и отрицательной (обратной). Степень корреляционной связи определяется по величине коэффициента корреляции. Сила связи не зависит от ее направленности и определяется по абсолютному значению коэффициента корреляции.

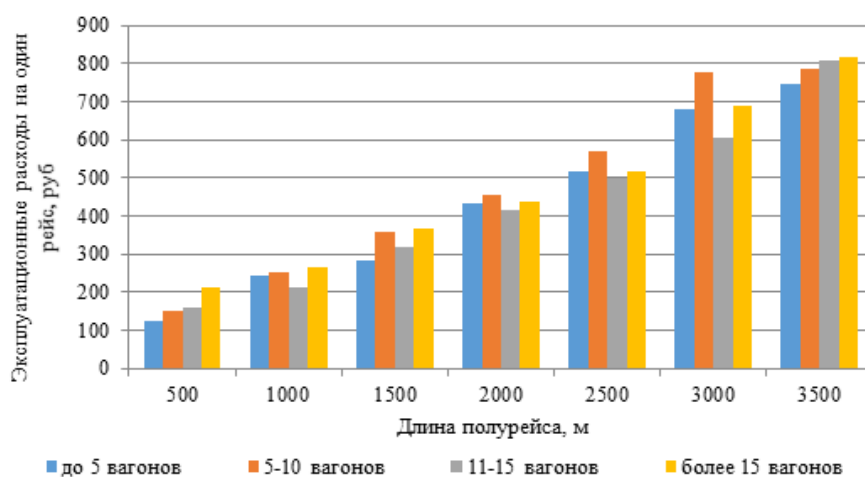
Далее проводится проверка гипотезы для коэффициента корреляции. Нулевая гипотеза

состоит в том, что коэффициент корреляции равен нулю, альтернативная – не равен нулю. Очевидно, достаточно большое по абсолютной величине значение величины коэффициента корреляции будет стремиться опровергнуть нулевую гипотезу.

В качестве критерия проверки гипотезы выступают критерии  $N_{эмп}$  и  $N_{кр}$ : если  $T_{эмп} > T_{кр}$ , то нулевую гипотезу отвергают и выборочный коэффициент корреляции значимо отличается от нуля, корреляция есть; если при  $T_{эмп} \leq T_{кр}$ , то нет оснований отвергать нулевую гипотезу и говорят, что выборочный коэффициент корреляции незначим, корреляции нет.

**Табл. 3.** Статистические показатели для уравнений зависимости эксплуатационных расходов от числа вагонов в маневровом составе и от длины полурейса по условной площадке  
**Table 3.** Statistical indicators for the equations of the dependence of operating costs on the number of wagons in the shunting train and on the length of the half-trip along the conditional platform

Статистический показатель Statistical indicator	Зависимость эксплуатационных расходов Dependence of operating costs	
	От числа вагонов в маневровом составе From the number of wagons in the shunting train	От длины полурейса по условной площадке From the length of the half-flight according to the conditional site
Коэффициент корреляции $r$ Correlation coefficient $r$	0,99	0,87
Эмпирическое значение $N_{эм}$ Empirical value of $N_{эм}$	111,06	5,06
Уровень значимости $\alpha$ , д.е. Significance level $\alpha$ , units	0,05	0,05
Критическое значение $N_{кр}$ Critical value $N_{кр}$	2,57	4,30



**Рис. 3.** Сводная диаграмма зависимости эксплуатационных расходов на выполнение рейса от удаленности расположения выставочных путей и числа вагонов в составе

**Fig. 3.** Summary diagram of the dependence of the operating costs of the flight on the remoteness of the location of the exhibition tracks and the number of wagons in the composition

Предложенная методика апробирована на реальном объекте в системе «железнодорожная станция ОАО «РЖД» Н – грузовая промышленная железнодорожная станция; Ю – погрузочно-выгрузочные пути терминала Т промышленной станции Ю».

На 2023 г. предприятием Т, обслуживаемым станцией Н, запланированы стабильные и возрастающие объемы местной работы, заключены договоры отправления поездов своего формирования по твердым ниткам графика в направлении Восточного полигона. Динамика выполнения местной работы предприятия показана на рис. 4.

### Заключение

Стоимость оказания услуг по техническому обслуживанию и ремонту вагонного парка на железнодорожном пути необщего пользования в соответствии с договором между ОАО «РЖД» и ООО «Фирма Т» (вариант 3) составляет 427 500,00 руб. в месяц (4,5 вагонников-осмотрщиков).

На основании вышеприведенных данных для выбора оптимального варианта места проведения осмотра вагонов по критерию минимума расходов составлена итоговая табл. 4.

Для определения оптимального варианта места выполнения технического осмотра ва-

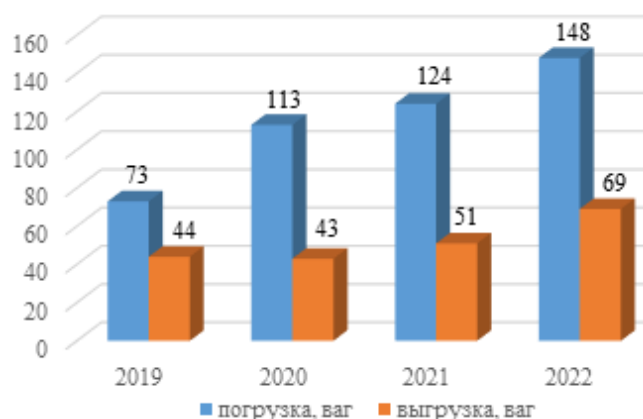


Рис. 4. Динамика среднесуточного выполнения местной работы в 2019–2022 гг., ваг.

Fig. 4. Dynamics of average daily performance of local work in 2019–2022, wag.

Табл. 4. Сравнительный анализ вариантов места выполнения технического осмотра вагонов

Table 4. Comparative analysis of options for the location of technical inspection of wagons

Показатель Indicator	Варианты Options		
	1	2	3
Время на один рейс, ч Time for one run, hour	0,38	0,10	–
Число рейсов в сутки Number of runs per day	4	4	–
Укрупненная расходная ставка на 1 ч работы маневрового локомотива, руб. Integrated expense rate for 1 hour of shunting locomotive operation, rub.	2 676,18		–
Эксплуатационные расходы на один рейс, руб. Operating costs per run, rub.	1 016,95	267,62	–
Суммарные расходы в месяц, руб. Total expenses per month, rub.	122 033,81	8 028,54	427 500,00

гонов под сдвоенные операции необходимо сравнение суммарных эксплуатационных расходов по вариантам.

Вариант проведения технического осмотра вагонов под сдвоенные операции на территории реальной промышленной станции является оптимальным для выполнения согласно минимальному значению эксплуатационных расходов.

Следовательно, расходы на содержание штата вагонников-осмотрщиков по договору (вариант 3) нецелесообразны.

Таким образом, использование разработанной методики позволит выбирать оптимальное место проведения работ по технической

передаче вагонов под сдвоенные операции по критерию минимума суммарных эксплуатационных расходов, а также обосновывать расходы на содержание штата осмотрщиков вагонов по договору для транспортных компаний ОАО «РЖД».

Результаты исследования могут быть использованы при составлении местных технологических процессов технического обслуживания грузовых вагонов по определению места проведения осмотра их под сдвоенные операции на основе требований типового технологического процесса работы пункта передачи вагонов и контроля за сохранностью вагонного парка.

#### Список литературы

1. Logistics performance and transport infrastructure / S. Nikolicic, M. Maslaric, J. Strohmmandl et al. // Proceedings of the 3rd Logistics International Conference. Belgrade, 2017. P. 142–147.
2. Freight transportation. Improvements and the Economy. Washington : DC, 2004. URL: [https://ops.fhwa.dot.gov/freight/documents/improve\\_econ.pdf](https://ops.fhwa.dot.gov/freight/documents/improve_econ.pdf) (Дата обращения 18.10.2023).
3. Liang J., Cheng W.-M., Zhang M. Simulation study on train loading-unloading operation at railway container terminal //

Journal of System Simulation. 2009. Vol. 21. P. 6290–6293.

4. Rietveld P. Brons M.R., Givoni M. Access to railway stations and its potential in increasing rail use // *Transportation Research. Part A: Policy and Practice*. 2009. Vol. 43 (2). P. 136–149.

5. Brons M.R., Rietveld P. Improving the Quality of the Door-to-Door Rail Journey: A Customer-Oriented Approach // *Built Environment*. 2009. Vol. 35 (1). P. 122–135.

6. Гренкевич О.О. Выбор оптимального места проведения работ по технической передаче вагонов на путях необщего пользования // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2014. Т. 1. С. 113–114.*

7. Гренкевич О.О. Новые технологии обслуживания железнодорожных составов // *Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2018. Ч. 3. С. 29–30.*

8. Гренкевич О.О. Разработка методики выбора оптимального способа формирования многогруппных составов по критерию эксплуатационных расходов на маневровую работу : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2004. 24 с.

9. Калидова А.Д. Определение параметров продольного профиля железнодорожной линии с учетом особенностей специализации по видам движения // *Политранспортные системы : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2020. С. 430–435.*

10. Нормы времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожных станциях ОАО «РЖД», нормативы численности бригад маневровых локомотивов (ред. 30.12.2015). М. : Техинформ, 2007. 100 с.

11. Бабичков А.М., Гурский П.А., Новиков А.П. Тяговое усилие поездов и тяговые расчеты. М. : Транспорт, 1971. 280 с.

12. Подвижной состав и основы тяги поездов / П.И. Борцов, В.А. Валетов, П.И. Кельперис и др. М. : Транспорт, 1983. 334 с.

13. Акимов В.И. Сборник задач по тяговым расчетам. Гомель : Белижт, 1988. 31 с.

14. Подвижной состав и основы тяги поездов / П.И. Борцов, В.А. Валетов, П.И. Кельперис и др. М. : Транспорт, 1990. 335 с.

15. Френкель С.Я. Методика тяговых расчетов. Гомель : БелГУТ, 2007. 72 с.

16. Гребенюк П.Т., Долганов А.Н., Скворцова А.И. Тяговые расчеты. М. : Транспорт, 1987. 271 с.

17. Тепловозы: основы теории и проектирования / В.Д. Кузьмич, И.П. Бородулин, Э.А. Пахомов и др. М. : Транспорт, 1991. 352 с.

18. Теория и конструкция локомотивов / Г.С. Михальченко, В.Н. Кашников, В.С. Коссов и др. М. : Маршрут, 2006. 584 с.

19. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. М. : Маршрут, 2005. 448 с.

20. Квашнина Е.В., Дерина Л.В. Тяговые расчеты на подъездном пути промышленного предприятия. Новокузнецк : СибГИУ, 2013. 56 с.

21. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.16 № 867р (ред. 02.02.2018). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.

## References

1. Nikolic S., Maslaric M., Strohmmandl J., Mircetic D. Logistics performance and transport infrastructure // *Proceedings of the 3rd Logistics International Conference. Belgrade, 2017, pp. 142–147.*

2. Transportation Infrastructure, Freight Services Sector and Economic Growth: a Synopsis. URL: [https://ops.fhwa.dot.gov/freight/documents/improve\\_econ.pdf](https://ops.fhwa.dot.gov/freight/documents/improve_econ.pdf) (Accessed October 18, 2023).

3. Liang J., Cheng W.-M., Zhang M. Simulation study on train loading-unloading operation at railway container terminal. *Journal of System Simulation*, 2009, vol. 21, pp. 6290–6293.

4. Rietveld P. Brons M.R., Givoni M. Access to railway stations and its potential in increasing rail use. *Transportation Research. Part A: Policy and Practice*, 2009, vol. 43 (2), pp. 136–149.

5. Brons M.R., Rietveld P. Improving the Quality of the Door-to-Door Rail Journey: A Customer-Oriented Approach. *Built Environment*, 2009, Vol. 35 (1), pp. 122–135.

6. Grenkevich O.O. Vybora optimal'nogo mesta provedeniya rabot po tekhnicheskoi peredache vagonov na putyakh neobshchego pol'zovaniya [Selection of the optimal location for the technical transfer of wagons on non-public tracks]. *Materialy V Mezhduнародной nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2014, vol. 1, pp. 113–114.

7. Grenkevich O.O. Novye tekhnologii obsluzhivaniya zheleznodorozhnykh sostavov [New technologies for servicing railway trains]. *Sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Traditsionnaya i innovatsionnaya nauka: istoriya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy»* [Proceedings of the international scientific and practical conference «Traditional and innovative science: history, current state, prospects»]. Ufa, 2018, part 3, pp. 29–30.

8. Grenkevich O.O. Razrabotka metodiki vybora optimal'nogo sposoba formirovaniya mnogogruppnykh sostavov po kriteriyu ekspluatatsionnykh raskhodov na manevrovuyu rabotu [Development of a methodology for choosing the optimal method for the formation of multi-group compositions according to the criterion of operational costs for maneuvering work]. Ph.D.'s thesis. Novosibirsk, 2004. 24 p.

9. Kalidova A.D. Opredelenie parametrov prodol'nogo profilya zheleznodorozhnoi linii s uchetom osobennostei spetsializatsii po vidam dvizheniya [Determination of the parameters of the longitudinal the profile of the railway line, taking into account the specifics of specialization by types of traffic]. *Materialy XI Mezhduнародной nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Politransportnye sistemy»* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference «Polytransport systems»]. Novosibirsk, 2020, pp. 430–435.

10. Normy vremeni na manevrovye raboty, vypolnyaemye na zheleznodorozhnykh stantsiyakh ОАО «RZHD», normativy chislennosti brigad manevrovnykh lokomotivov (red. 30.12.2015) [Norms of time for shunting work performed at railway stations of JSC «Russian Railways», standards for the number of shunting locomotive crews (ed. December 30, 2015)]. Moscow: Tekhin-

form Publ., 2007. 100 p.

11. Babichkov A.M., Gurskii P.A., Novikov A.P. Tyagovoe usilie poezdov i tyagovye raschety [Traction force of trains and traction calculations]. Moscow: Transport Publ., 1971. 280 p.

12. Bortsov P.I., Valetov V.A., Kel'peris P.I., Men'zhinskii L.I., Nalivkin M.G., Osipov S.I., Semenov M.Ya. Podvizhnoi sostav i osnovy tyagi poezdov [Rolling stock and the basics of train traction]. Moscow: Transport Publ., 1983. 334 p.

13. Akimov V.I. Sbornik zadach po tyagovym raschetam [Digest of tasks on traction calculations]. Gomel': BelIIZhT Publ., 1988. 31 p.

14. Bortsov P.I., Valetov V.A., Kel'peris P.I., Men'zhinskii L.I. et al. Podvizhnoi sostav i osnovy tyagi poezdov [Rolling stock and the basics of train traction]. Moscow: Transport Publ., 1990. 335 p.

15. Frenkel' S.Ya. Metodika tyagovykh raschetov [Technique of traction calculations]. Gomel': BelGUT Publ., 2007. 72 p.

16. Grebenyuk P.T., Dolganov A.N., Skvortsova A.I. Tyagovye raschety [Traction calculations]. Moscow: Transport Publ., 1987. 271 p.

17. Kuz'mich V.D., Borodulin I.P., Pakhomov E.A. et al. Teplovozy: osnovy teorii i proektirovaniya [Diesel locomotives: fundamentals of theory and design]. Moscow: Transport Publ., 1991. 352 p.

18. Mikhali'chenko G.S., Kashnikov V.N., Kossov V.S., Simonov V.A. Teoriya i konstruktsiya lokomotivov [Theory and design of locomotives]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 424 p.

19. Kuz'mich V.D., Rudnev V.S., Frenkel' S.Ya. Teoriya lokomotivnoi tyagi [Theory of locomotive traction]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 448 p.

20. Kvashnina E.V., Derina L.V. Tyagovye raschety na pod'ezdnom puti promyshlennogo predpriyatiya [Traction calculations on the access road of an industrial enterprise]. Novokuznetsk: SiBGIU Publ., 2013. 56 p.

21. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 12.05.16 № 867r «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» (red. 02.02.2018) [Order of JSC «Russian Railways» dated May 12, 16 No 867r «On approval of the rules of traction calculations for train work» (ed. February 2, 2018)].

#### Информация об авторах

**Гренкевич Ольга Олеговна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железнодорожных станций и узлов, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск; e-mail: ogrenkevich@mail.ru.

**Калидова Александра Дмитриевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры железнодорожных станций и узлов, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск; e-mail: alexsandra\_kd@bk.ru.

#### Information about the authors

**Ol'ga O. Grenkevich**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Stations and Junctions, Siberian Transport University, Novosibirsk; e-mail: ogrenkevich@mail.ru.

**Alexandra D. Kalidova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Railway Stations and Junctions, Siberian Transport University, Novosibirsk; e-mail: alexsandra\_kd@bk.ru.



## Новые подходы к моделированию устойчивости бесстыкового пути в среде конечно-элементного анализа

Д.В. Овчинников✉

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Российская Федерация

✉ovchinnikov@samgups.ru

### Резюме

В статье рассмотрены подходы к решению актуального на данный момент вопроса, касающегося безопасного расширения полигона бесстыкового пути с недопущением потери устойчивости против выброса. Проведено исследование существующих методов оценки запаса устойчивости бесстыкового пути начиная от самых простых, не требующих значительных вычислений, заканчивая методиками, которые реализуются с помощью специализированного программного обеспечения, обозначены их преимущества, недостатки и возможные сферы применения в зависимости от спектра решаемых задач. Представлена модель участка бесстыкового пути, выполненная в среде конечно-элементного анализа, оптимальная с точки зрения ширины диапазона задания начальных условий и получения выходных данных (результатов). Показаны способы нивелирования одного из самых существенных недостатков метода конечных элементов – уход от необходимости перестроения модели при изменении исходных данных за счет разработанных программ-макросов в среде Visual Basic for Applications, значительно упрощающих процессы формирования моделей, а также вывода и анализа результатов. В работе описывается новый подход определения параметров максимально допустимого превышения температуры рельсов относительно температуры закрепления, основанный на моделировании процесса выброса, позволяющий получать параметры устойчивости для любой конструкции пути. При этом с помощью методов теории вероятности вычисляются значения критических температур для заранее выбранных критериев оценки запаса устойчивости бесстыкового пути, статистическая взаимосвязь в которых при использовании моделирования и эмпирических методов максимальна, что помогает вычислить «условно эмпирические» величины повышения температуры рельсовой плети, допускаемые по условию устойчивости.

### Ключевые слова

бесстыковой путь, устойчивость, выброс пути, моделирование, критерии потери устойчивости

### Для цитирования

Овчинников Д.В. Новые подходы к моделированию устойчивости бесстыкового пути в среде конечно-элементного анализа / Д.В. Овчинников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 112–122. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).112-122.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 10.11.2023 г.; поступила после рецензирования: 04.12.2023 г.; принята к публикации: 05.12.2023 г.

## New approaches to modeling the stability of a long-welded rails in the environment of finite element analysis

D.V. Ovchinnikov✉

Samara State Transport University, Samara, the Russian Federation

✉ovchinnikov@samgups.ru

### Abstract

The article discusses the existing approaches to solving the currently relevant issue concerning the safe expansion of the landfill of a joint-free track with the prevention of counter ejection stability loss. The study has been conducted of the existing methods for assessing the stability margin of a seamless path, ranging from the simplest ones not requiring significant calculations, to methods implemented with the help of specialized software, their advantages, disadvantages and possible applications depending on the range of tasks to be solved. A jointless track section model made in the environment of finite element analysis is presented, optimal in terms of the range width of setting initial conditions and obtaining output data (results). The methods of leveling one of the most significant disadvantages of the finite element method are shown i.e./ avoiding the need to rebuild the model when changing the initial data due to the developed macro programs in the Visual Basic for Applications environment, greatly simplifying the process of forming models, as well as output and analysis of results. The work also shows a new approach for determining the parameters of the maximum permissible rail temperature excess, relative to the fixing temperature, based on modeling the ejection process, which allows to obtain stability parameters for any track structure. At the same time, using the methods of probability theory, the values of critical temperatures are calculated for the pre-selected criteria for assessing the stability margin of a jointless track, whose statistical relationship, when using modeling and empirical methods, is maximal, which makes it possible to obtain «conditionally empirical» values of the temperature increase of the rail lash allowed by the stability tolerance of the track.

**Keywords**

joint-free track, stability, track ejection, modeling, criteria for loss of stability

**For citation**

Ovchinnikov D.V. Novye podkhody k modelirovaniyu ustoichivosti besстыkovogo puti v srede konechno-elementnogo analiza [New approaches to modeling the stability of a long-welded rails in the environment of finite element analysis]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 112–122. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).112-122.

**Article info**

Received: November 10, 2023; Revised: December 4, 2023; Accepted: December 5, 2023.

**Введение**

Бесстыковой путь однозначно доказал эффективность своей работы в пределах полигона железных дорог Российской Федерации. Применение температурно-напряженной конструкции пути позволяет в большей степени использовать потенциал скоростной и провозной способностей современных железнодорожных линий за счет неоспоримых преимуществ бесстыкового пути перед звеньевым. В то же время эксплуатация бесстыкового пути всегда связана с образованием значительных продольных усилий и напряжений, возникающих в рельсовых плетях при изменении их температуры относительно температуры закрепления – разница между фактической температурой и температурой закрепления рельсовых плетей всего в 1°C создает дополнительные продольные усилия величиной около 2 т. Данное обстоятельство в очередной раз подтверждает необходимость соблюдения всех существующих норм и правил безопасности при производстве работ, связанных с текущим содержанием бесстыкового пути, а также обосновывает применение наиболее точных и современных подходов к установлению предельного нагрева плетей для недопущения выброса в процессе эксплуатации. В настоящий момент нет единого универсального подхода к определению максимального повышения температуры рельсовых плетей относительно их температуры закрепления для любой конструкции пути, в том числе для перспективных разработок:

– конструкция пути, обеспечивающая наработку 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа;

– конструкция пути для выделенных пассажирских линий и с пониженной нагрузкой на ось;

– утяжеленная конструкция пути с рельсами типа Р71.

Целью данной работы является представление на основе математического моделирования и методов статистики подхода к решению данной актуальной задачи – разработка метода оценки устойчивости бесстыкового пути для любой конструкции верхнего строения пути с учетом требований, изложенных в единственном на данный момент руководящем документе ОАО «РЖД» касательно нормирования запаса устойчивости бесстыкового пути – Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (далее – Инструкция) [1].

Результатом применения данного способа являются численные параметры максимально допустимого повышения температуры для набора радиусов аналогично Инструкции при любой конфигурации верхнего строения пути (тип рельса, промежуточных рельсовых скреплений, шпал и балластного слоя). При этом полученные результаты рассчитаны на моделях, статистическая связь которых максимальна с реальными конструкциями пути, на которых проводились экспериментальные исследования устойчивости против выброса при разработке Инструкции.

**Методы оценки максимальных продольных сил, возникающих при нагреве рельсовых плетей**

Методы оценки запаса устойчивости можно разделить на эмпирические (экспериментальные) и теоретические. Метод прямого эксперимента является наиболее точным и надежным способом определения предельного состояния бесстыкового пути. В то же время, применение дорогостоящего тензометрического оборудования, требующего регулярную настройку и поверку, а также значительные трудовые и материальные затраты существенно ограничивают сферы применения эмпирических методов.

Теоретические методы очень разнообразны в плане подходов к решению задачи определения устойчивости бесстыкового пути, непрерывно развиваясь параллельно с математическим аппаратом, представляют собой эволюционный процесс от решения задачи потери устойчивости сжатого стержня до применения современных пакетов автоматизированного проектирования и расчета.

В данной работе кратко остановимся на каждом наиболее значимом подходе, которые применялись и применяются в настоящее время.

**Энергетический метод расчета.** Данный подход, который берет начало в 30-х гг. XX в., основывается на условии равновесия или равенстве нулю суммы элементарных работ (обобщенных сил), либо условия экстремума потенциальной энергии системы, из которых находят критическую сжимающую силу. Главное достоинство данного метода – простота его применения: постановка в формулу определения критической силы заранее вычисленных коэффициентов аппроксимации экспериментальных данных. Однако ни спектр задания исходных данных, ни точность получаемых результатов не позволяют успешно использовать данный подход для решения актуальных задач в области безопасности бесстыкового пути, возможен лишь приближенный подсчет критических усилий с заранее определенной формой изгиба.

К.Н. Мищенко [2] был предложен ряд уравнений изогнутой оси, решение которых позволило приблизиться к реальным формам искривления рельсошпальной решетки.

Широкое применение энергетическая модель устойчивости бесстыкового пути получила в интерпретации С.П. Першина, который, учитывая все достижения и недоработки указанных авторов, создал фундаментальный труд по определению критических сил с применением различных уравнений кривых для описания состояния пути [3].

Также в России известна энергетическая модель устойчивости В.В. Ершова [4–6] и В.И. Новаковича [7–9].

**Метод дифференциальных уравнений.** Наиболее полное решение вопроса устойчивости бесстыкового пути методом дифференциальных уравнений опубликовано в работах А.Я. Когана [10–12]. Решение дифференциального уравнения, опубликованное А.В. Лебедевым под руковод-

ством А.Я. Когана [13], нашло применение при работе над Инструкцией.

**Метод дифференциальных уравнений.** Наиболее полное решение вопроса устойчивости бесстыкового пути методом дифференциальных уравнений опубликовано в работах А.Я. Когана [10–12]. Решение дифференциального уравнения, опубликованное А.В. Лебедевым под руководством А.Я. Когана [13], нашло применение при работе над Инструкцией.

В основу положена расчетная схема (рис. 1).

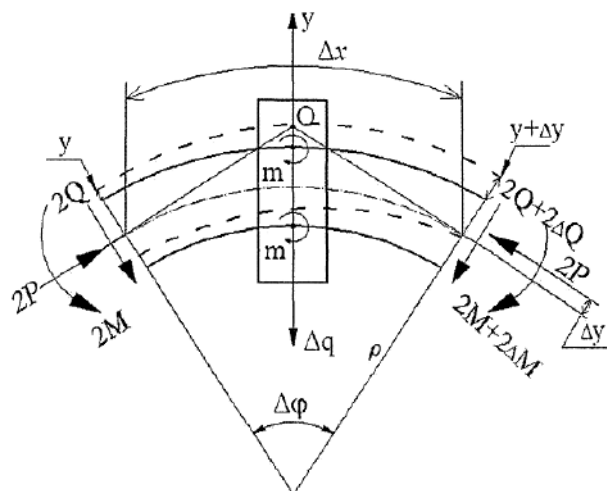


Рис. 1. Расчетная схема пути при использовании

уравнения упругой оси

Fig. 1. Calculation diagram of the track using the elastic axis equations

Поставленная задача была решена при следующих допущениях:

1. Продольные силы в обоих нитях одинаковы и постоянны  $N = \text{const}$ , величина продольной силы при этом равна полусумме фактически действующих в обоих рельсовых нитях сил.

2. Радиус кривизны обеих нитей один и тот же  $\rho(x)$ , при этом кривизна  $1/\rho$  равна полусумме кривизны наружной и внутренней нитей.

3. При деформации пути шпалы перемещаются параллельно сами себе.

Профессором А.Я. Коганом получено интегро-дифференциальное уравнение, которое описывает продольно-поперечный изгиб рельсовой нити под действием продольных температурных сил:

$$EJy^{IV} + \left( P_t - q - \frac{M \cdot r}{r^2 + (y')^2} \right) \cdot y'' + B \cdot \arctg \frac{y}{b} - \frac{h}{4\eta} (y'' + y_0'') \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\eta|x-z|} [y'(z)]^2 dz = -P_t y_0''.$$

где  $y = y(x)$  – поперечный сдвиг рельсовой плети;  $EJ$  – изгибная жесткость рельса;  $B \cdot \arctg(y/b)$  – функция, описывающая сопротивление поперечному перемещению рельсовой нити в зависимости от величины перемещения;  $P_t$  – продольная сила в рельсе;  $y_0 = y_0(x)$  – ордината начальной ненапряженной неровности рельсовой нити;  $B, b, q, M, r$  – коэффициенты, получаемые при аппроксимации экспериментальных данных.

Метод дифференциальных уравнений обладает широким набором необходимых исходных данных и, в отличие от метода энергетического, позволяет в процессе решения получать форму изгиба рельсошпальной решетки под действием продольных сжимающих сил. Однако данный подход не располагает возможностью задания отступлений от норм содержания элементов верхнего строения пути, отступлений от норм содержания в плане и профиле, а также не дает возможности исследовать сам процесс деформации плетей при нагреве, ограничиваясь лишь значением предельных параметров стрел изгиба и критических усилий.

Метод имитационного моделирования (метод конечных разностей). Профессором М.Ф. Вериго [14], по сути, было представлено свое видение решения уравнения балки на упру-

гом основании с дополнительным введением параметра, отвечающего за кинетику процесса развития деформаций, возникающих при возрастании температуры рельсовых плетей. Решение полученного уравнения осуществлено в среде конечно-разностного анализа посредством языка программирования Delphi – имитационные модели пути ИМ-1 и ИМ-2. Использование данного подхода, по мнению автора, позволяло перейти от статического нагружения бесстыкового пути к динамическому с добавлением вариативного фактора. При всех описанных достоинствах данного метода, полноценно оценить работу имитационных моделей в настоящий момент не представляется возможным ввиду присутствия в коде программы ряда критических ошибок. Отчасти по этой же причине данная методика не нашла развития и не обрела последователей вплоть до настоящего времени.

Метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными и интегральных уравнений в задачах прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики [15–19].

Также абсолютно обоснованным выглядит применение метода конечных элементов для оценки максимально допустимого повышения температуры рельсов относительно температуры закрепления, вследствие неограниченного набора задания исходных данных, а также возможности отслеживания всего про-

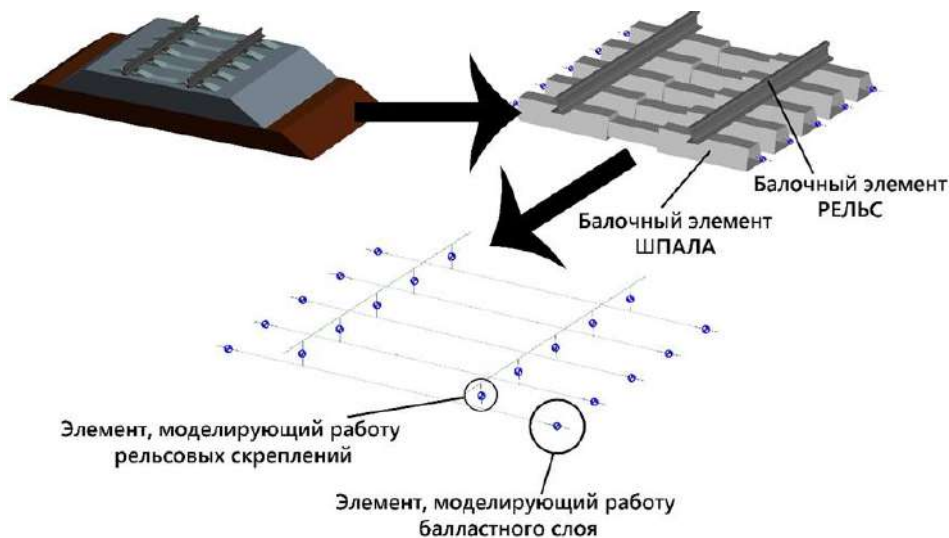


Рис. 2. Концепция создания модели для определения устойчивости бесстыкового пути  
Fig. 2. The concept of creating a model to determine the stability of a seamless track

процесса нагрева рельсов вплоть до потери устойчивости.

### **Разработка модели по оценке устойчивости бесстыкового пути в среде конечно-элементного анализа**

Пример участка пути для решения задач устойчивости пути, состоящий из балочных элементов (рельс, шпала), а также нелинейных связей с шестью степенями свободы (промежуточные рельсовые скрепления, балластный слой), представлен на рис. 2.

Такой подход к построению модели позволяет учитывать в расчете следующие параметры:

- макрогеометрия пути (радиус);
- микрогеометрия пути (наличие локальных неровностей);
- поперечное сопротивление балластного слоя;
- сопротивление шпалы в балласте вдоль пути;
- сопротивление кручению рельса относительно рельсовых скреплений;
- продольное сопротивление сдвигу рельса относительно рельсовых скреплений;
- неравномерность нагрева плетей;
- накопление напряжений и деформаций, возникающих при нагреве плети;
- неравномерность основных типов сопротивлений, оказывающих влияние на устойчивость, причем как в виде случайной величины, подчиняющейся закону распределения, так и в формате хаотично заданной величины в ручном режиме (к примеру, ослабление балласта на нескольких шпалах подряд).

Функции сопротивления для математической модели представляют собой аппроксимацию экспериментальных данных, полученных с помощью специализированных испытаний по сдвигу шпалы в балласте, кручению рельса в узле скрепления и пр., т.е. для исследования новой конструкции верхнего строения пути, у которой имеются существенные отличия от типовой в аспекте сопротивления температурным деформациям, достаточно провести ряд несложных испытаний. Удобнее всего при моделировании использовать функции арктангенса с коэффициентами  $B$  и  $b$ , полученными экспериментальным путем  $B \cdot \arctg(x/b)$ .

Таким образом, применение метода конечных элементов позволяет использовать

наиболее широкий спектр задания начальных условий, ограниченных лишь необходимостью перестроения заново макро- и микрогеометрии исследуемого участка пути, что делает затруднительными и трудоемкими многовариантные расчеты. Это обстоятельство до определенного времени являлось препятствием для широкого внедрения оценки устойчивости бесстыкового пути в среде конечно-элементного анализа. Однако в настоящее время с появлением инструментов программирования, интегрированных в программные комплексы на основе метода конечных элементов, становится возможным автоматизировать процесс создания моделей, тем самым значительно расширив область применения метода конечных элементов для решения задач устойчивости.

Несмотря на обилие существующих в настоящее время теоретических средств оценки предельных продольных температурных усилий, расчетные параметры повышения температуры рельсовой плети, допускаемые по условию устойчивости пути (обозначается как  $[\Delta t_y]$ ), представленные в Инструкции, невозможно получить аналитическим путем только с помощью моделирования. Это говорит о том, что при разработке Инструкции были добавлены дополнительные (поправочные) коэффициенты запаса, учитывающие не только тип рельса, радиус кривой и эпюру шпал, но также и деградиационные процессы, происходящие в элементах пути при воздействии подвижного состава на путь. Точно установить порядок вычисления дополнительных коэффициентов, использованный в Инструкции, в настоящее время не представляется возможным, однако ряд значений, наиболее статистически близких к данным коэффициентам, поддается вычислению с помощью методов математической статистики по следующему алгоритму:

1. Определение многообразия исходных данных для моделирования. В данном случае рассмотрим макро- и микрогеометрию пути, где исследуемые радиусы кривых идентичны радиусам, представленным в Инструкции. В качестве микрогеометрии выступают локальные неровности различной длины и амплитуды.

2. Назначение критериев критического состояния пути (более подробно разобраны далее).

3. Вычисление массива критических температур для выбранного множества вариантов.

4. Определение корреляции между мас-

сивом предельных повышений температур из Инструкции и полученных с помощью моделирования.

5. Вычисление дополнительных коэффициентов запаса устойчивости как частное от теоретического значения повышения температуры рельсовой плети, допускаемого по условию устойчивости пути, и эмпирического для состояния пути с максимальной статистической связью.

6. Вычисление параметров  $[\Delta t_y]$  исследуемой новой конструкции верхнего пути по критерию, для которого корреляционная связь максимальна относительно типовой, представленной в Инструкции.

В качестве критериев выступают:

- максимальная скорость роста стрелы изгиба при нагреве рельсовых плетей – отношение приращения стрелы изгиба к приращению температуры,  $\Delta f/\Delta t$  (как правило, данный критерий идентичен образованию выброса пути, так как именно при выбросе наблюдается наибольший и резкий рост стрелы изгиба);

- поперечное перемещение на 0,2, 0,4, 0,5, 1, 2 и 3 мм;

Достаточно малые перемещения (0,2–0,5 мм) соответствуют критериям, на основе которых были получены первые величины  $[\Delta t_y]$ , использованные в дальнейшем при фор-

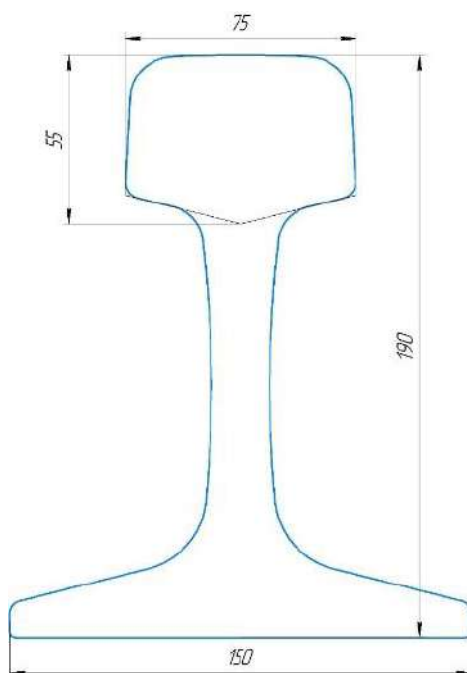
мировании Инструкции, критерии 1–3 мм соответствуют границам зон упругой работы балластного слоя в различном его состоянии, при сдвиге шпал поперек оси пути.

Следует отметить, что применение такого подхода становится возможным только посредством автоматизации процесса создания модели, запуска на расчет и последующего анализа данных с помощью макросов.

В качестве примера использования данного подхода к установлению показателей устойчивости бесстыкового пути представлено определение величин  $[\Delta t_y]$  для перспективного типа верхнего строения с рельсами Р71 разработки ООО «ЕВРАЗ ТК» и Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС). Общие размеры рельса представлены на рис. 3.

На рис. 4 приведен пример потери устойчивости пути, выполненный в среде конечно-элементного моделирования.

Наибольший коэффициент корреляции, близкий к единице, между показателями запаса устойчивости для рельса Р65, эпюры 1 840 и 2 000 шп./км, представленными в Инструкции и вычисленными в среде конечно-элементного анализа, наблюдается для участка пути с локальной неровностью длиной 10 м и амплитудой 8 мм для критерия максимальной



**Рис. 3.** Общие размеры рельса типа Р71  
**Fig. 3.** General dimensions of rail type P71

скорости роста деформации (табл. 1). Такой высокий показатель корреляции подтверждает сильную статистическую связь между представленной математической моделью и реальной конструкцией пути, использованной при разработке Инструкции.

В этом случае график зависимости поправочного коэффициента от радиуса кривой примет вид как на рис. 5. Здесь также представлены уравнения аппроксимации данной зависимости.

Результаты графического отображения однозначно говорят о невозможности проведения аппроксимации функции поправочного коэффициента по всему диапазону радиусов ввиду резких скачков в кривых малого радиуса, параметры  $[\Delta t_y]$  для которых были введены начиная с 2012 г. Связано это с изменением подхода к определению  $[\Delta t_y]$ :

– переход на новые критерии оценки предвыбросного состояния пути, исключающий предельные малые перемещения величиной 0,2–0,4 мм;

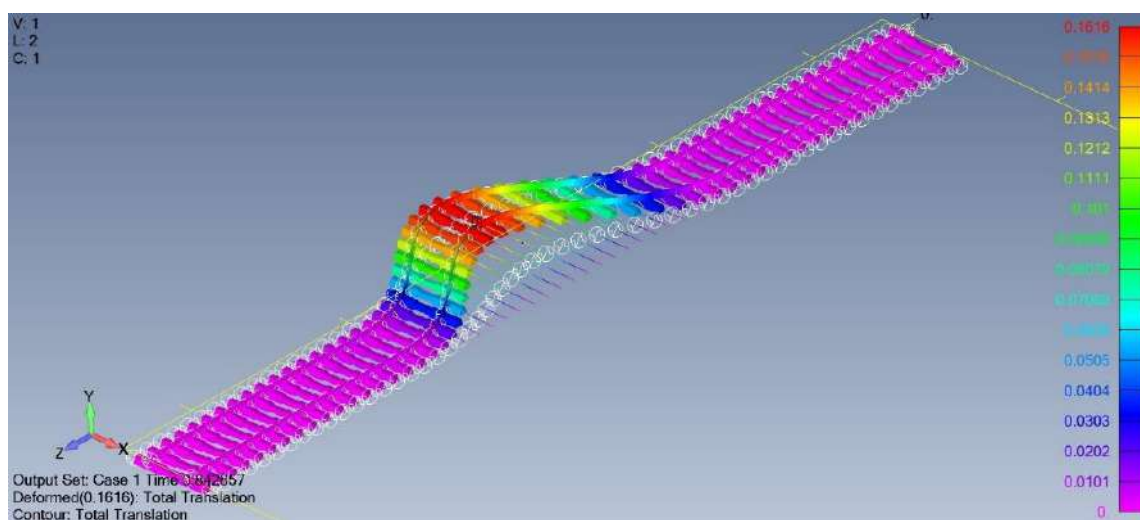


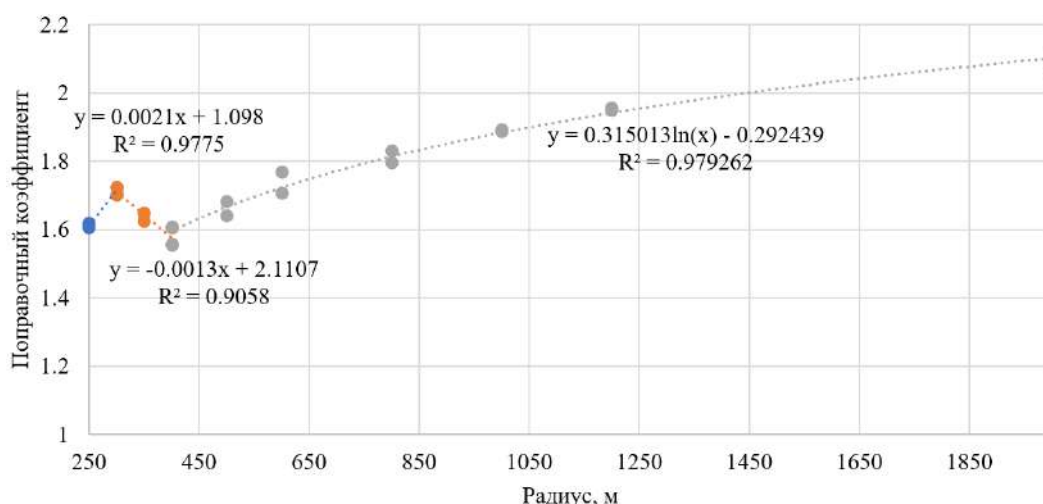
Рис. 4. Пример потери устойчивости бесстыкового пути, выполненный с помощью представленной модели

Fig. 4. An example of buckling of a seamless track, performed using the presented model

Таблица 1. Корреляция между моделированием и значениями, представленными в Инструкции

Table 1. Correlation between simulation and values presented in the Instructions

Параметры локальной неровности (длина/амплитуда), мм Parameters of local unevenness (length/amplitude), mm	Инструкция Instruction	Максимальная скорость роста Maximum growth rate	Перемещение, мм Displacement, mm					
			0,2	0,4	0,5	1	2	3
10/8	28	57	11	20	23	33	41	44
	29	60,5	13	23	27	38	48	51
	34	67	15	26	30	44	55	60
	38	75	16	29	34	50	63	68
	41	86	20	35	42	62	77	83
	43	96,5	23	42	49	73	90	96
	47	115	30	53	63	93	112	115
	49	128,5	35	63	74	108	128	128,5
	51	142,5	41	74	87	125	142	142,5
53	171	57	100	116	159	171	171	
Корреляция с Инструкцией Correlation with Instructions		<b>0,9791</b>	0,9324	0,9503	0,9506	0,9611	0,9724	0,9784



**Рис. 5.** Зависимость поправочного коэффициента от радиуса кривой и уравнение аппроксимации  
**Fig. 5.** Dependence of the correction factor on the radius of the curve and the approximation equation

– нагрев рельсовых плетей электротокотом;  
 – фиксирование скорости роста стрел изгиба без доведения до потери устойчивости с последующим выводом критической температуры.

Применение одной универсальной функции перехода от аналитических данных к «условно экспериментальным» невозможно ввиду отсутствия строгой математической зависимости, описывающей функцию  $k$  для различных радиусов:

$$k = \frac{[\Delta t_y]_{\text{МКЭ}}}{[\Delta t_y]_{\text{ТУ}}}, \quad (1)$$

где  $[\Delta t_y]_{\text{МКЭ}}$  – максимальное допустимое превышение температуры рельсов относительно температуры закрепления, полученное с помощью моделирования при условии наивысшей корреляции модели и эмпирических данных;  $[\Delta t_y]_{\text{ТУ}}$  – максимально допустимое превышение температуры рельсов относительно температуры закрепления, представленное в Инструкции для верхнего строения пути с наивысшей статистической связью с результатами моделирования;  $k$  – переходной (поправочный) коэффициент для конкретного типа верхнего строения пути.

Для определения допустимого повышения температуры рельсов по сравнению с температурой закрепления при использовании типовой конструкции верхнего строения пути с рельсами Р71 целесообразно выполнить цепочку следующих решений:

1. Разработка конечно-элементной модели типовой конструкции пути с утяжеленными

рельсами типа Р71 при наличии отступления от норм содержания в плане в виде неровности длиной 10 м и амплитудой 8 мм при эюре 1 840 и 2 000 шп./км.

2. Расчет величин  $[\Delta t_y]$  в среде конечно-элементного анализа при использовании рельсов Р71 для пути с неровностью длиной 10 м и амплитудой 8 мм при эюре шпал 1 840 и 2 000 шп./км.

3. Определение переходного (поправочного) коэффициента  $k$  по (1).

4. Определение «условно эмпирических» значений  $[\Delta t_y]$  при использовании рельсов Р71 в виде частного аналитического значения и поправочного коэффициента для эюры шпал 1 840 и 2 000 шп./км.

Величины  $[\Delta t_y]$ , полученные с помощью математического моделирования и поправочного коэффициента, представлены в табл. 2.

## Заключение

1. Показана актуальность проблемы определения запаса устойчивости пути как одного из важнейших критериев обеспечения безопасности движения поездов, а также расширения полигона наиболее эффективной температурно-напряженной конструкции верхнего строения пути.

2. Рассмотрены и проанализированы существующие подходы к определению запаса устойчивости бесстыкового пути, обозначены их основные достоинства и недостатки, а также возможные сферы применения той или иной методики в зависимости от поставленных задач.



**Таблица 2.** Повышение температуры рельсовой плети, допускаемое по условию устойчивости пути с рельсами типа Р71**Table 2.** An increase in the temperature of the rail line, allowed under the condition of stability of the track with type Р71 rails

Радиус кривой, м Curve radius, m	Рельсы Р71, эпо́ра 1 840 Rails Р71, diagram 1 840	Рельсы Р71, эпо́ра 2 000 Rails Р71, diagram 2 000
250	26,0	24,2
300	27,0	26,8
350	32,0	31,8
400	36,0	35,4
500	39,0	38,5
600	41,0	40,3
800	44,6	44,1
1 200	45,5	45,5
2 000	47,5	47,6
Прямая Straight line	50,5	49,8

3. Существующие методы не позволяют в полной мере перейти от эмпирических исследований к теоретическим при определении запаса устойчивости бесстыкового пути для перспективных конструкций, как утяжеленного типа, так и верхнего строения пути для пассажирских перевозок.

4. Разработана и представлена конечно-элементная модель бесстыкового пути, позволяющая определять повышение температуры рельсовой плети, допускаемое по условию устойчивости пути, при неограниченном наборе исходных данных.

5. Посредством специализированных программ-макросов автоматизирован процесс создания моделей в среде конечно-элементного анализа, запуска на расчет и вывода результатов, благодаря чему проведен многовариантный расчет нагрева рельсовых плетей криволинейных участков с различными радиусами, а также начальной неровностью.

6. Предложены критерии определения запаса устойчивости бесстыкового пути с

дальнейшим определением варианта с наибольшей корреляцией результатов математического моделирования и данных, полученных опытных путем.

7. Получены поправочные коэффициенты, с помощью которых совместно с математическим моделированием возможно определение параметров  $[\Delta t_r]$  для любой конфигурации верхнего строения пути, упрощающее и снижающее стоимость проведения трудоемких эмпирических исследований.

8. С помощью представленной модели бесстыкового пути продемонстрирован новый подход к определению запаса устойчивости бесстыкового пути: определены величины максимального повышения температуры рельсовой плети для верхнего строения пути с рельсами типа Р71 (перспективная разработка ООО «ЕВРАЗ ТК» и СамГУПС).

9. Использование рельса Р71 не является препятствием для применения бесстыкового пути в регионах с большими температурными амплитудами.

#### Список литературы

1. Об утверждении и введении в действие инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р (ред. 10.04.2023). Доступ из справ.-правовой системы АС-ПИЖТ в локал. сети.
2. Мищенко К.Н. Бесстыковой рельсовый путь. М. : Трансжелдориздат, 1950. 88 с.
3. Першин С.П. Метод расчета устойчивости бесстыкового пути. // Труды МИИТ : сб. ст. М., 1962. Вып. 147 : путь и путевое хозяйство. С. 28–97.
4. Ершов В.В. Аналитический метод определения устойчивости бесстыкового пути // Путь и путевое хозяйство. 2006. № 6. С. 10–12.
5. Ершов В.В. Устойчивость бесстыкового пути при отступлениях от норм содержания // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 3. С. 13–15.
6. Ершов В.В., Корся В.Б., Шувалова О.М. Выбор расчетного сечения при определении поперечной устойчивости

бесстыкового пути // Путь и путевое хозяйство. 2010. № 6. С. 27–28.

7. Новакович В.И., Карпачевский Г.В., Курилина И.А. Изменения в рельсошпальной решетке при воздействии поездов // Путь и путевое хозяйство. 2004. № 5. С. 25–28.

8. Новакович В.И. Продольные силы при вывеске рельсошпальной решетки бесстыкового пути // Вестник ВНИИЖТ. 1967. № 6. С. 49–52.

9. Новакович В.И. О ползучести бесстыкового пути в поперечном направлении под действием продольных сил // Вестник ВНИИЖТ. 1976. № 5. С. 39–42.

10. Коган А.Я., Грищенко В.А., Косенюк В.К. Устойчивость бесстыкового пути при температурном воздействии // Обеспечение надежности и эффективности бесстыкового пути в сложных условиях эксплуатации : межвуз. сб. науч. тр. Новосибирск, 1991. С. 5–15.

11. Коган А.Я., Грищенко В.А. Нелинейная устойчивость бесстыкового пути в прямых участках при наихудшей форме начальной ненапряженной неровности // Вестник ВНИИЖТ. 1992. № 3. С. 40–45.

12. Коган А.Я. Продольные силы в железнодорожном пути. М. : Транспорт, 1967. 168 с.

13. Коган А.Я., Лебедев А.В. Устойчивость бесстыкового пути при различных конструкциях скреплений и условиях их эксплуатации // Вестник ВНИИЖТ. 2007. № 2. С. 3–9.

14. Вериго М.Ф. Новые методы в установлении норм устройства и содержания бесстыкового пути. М. : Интекст, 2000. 184 с.

15. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при различных условиях эксплуатации на основе моделирования методом конечных элементов / А.Ю. Абдурашитов, Д.В. Овчинников, В.П. Сычев и др. // Известия Транссиба. 2023. № 1 (53). С. 62–73.

16. Овчинников Д.В. 3D-моделирование напряженно-деформированного состояния элементов пути // Железнодорожный транспорт. 2023. № 3. С. 50–53.

17. Ovchinnikov D.V., Gall'yanov D.I. Evaluation of Rail Overturning under the Influence of Lateral Forces by Mathematical Modeling // Transportation Research Procedia : proceedings of the XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability. Irkutsk, 2022. P. 717–725.

18. Ковенькин Д.А., Сулемина А.Э., Покацкий В.А. Оценка зоны влияния бокового воздействия подвижного состава на рельсошпальную решетку // Проблемы путевого хозяйства Восточной Сибири : сб. науч. тр. Иркутск, 2004. Т. 2. С. 71–74.

19. Ковенькин Д.А. Исследование воздействия суммарных боковых сил на элементы верхнего строения пути при вписывании экипажа в кривые участки пути // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации российских железных дорог : материалы всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2007. Т. 1. С. 23–26.

## References

1. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 14.12.2016 № 2544r «Ob utverzhdenii i vvedenii v deistvie instruksii po ustroistvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti» (red. 10.04.2023) [Order of JSC «Russian Railways» dated December 14, 2016 No 2544r «On the approval and implementation of the instructions for the installation, installation, maintenance and repair of a jointless track» (ed. April 10, 2023)].

2. Mishchenko K.N. Besstykovoi rel'sovyi put' [Joint-less rail track]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1950. 88 p.

3. Pershin S.P. Metod rascheta ustoichivosti besstykovogo puti [Method of calculating the stability of a joint-less track]. *Sbornik statei «Trudy MIIT». Vyp. 147: put' i putevye khozyaistvo* [Proceedings of the Moscow Institute of Railway Transport. Iss. 147. Track and Track Facilities]. Moscow, 1962, pp. 28–97.

4. Ershov V.V. Analiticheskii metod opredeleniya ustoichivosti besstykovogo puti [Analytical method for determining the stability of a jointless track]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2006, no. 6, pp. 10–12.

5. Ershov V.V. Ustoichivost' besstykovogo puti pri otstupleniyakh ot norm soderzhaniya [Stability of a jointless track with deviations from the standards of maintenance]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2008, no. 3, pp. 13–15.

6. Ershov V.V., Korsya V.B., Shuvalova O.M. Vybora raschetnogo secheniya pri opredelenii poperechnoi ustoichivosti besstykovogo puti [The choice of the design cross-section when determining the transverse stability of a jointless track]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2010, no. 6, pp. 27–28.

7. Novakovich V.I., Karpachevskii G.V., Kurilina I.A. Izmeneniya v rel'soshpal'noi reshetke pri vozdeistvii poezdov [Changes in the rail-sleeper grid under the influence of trains]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2004, no. 5, pp. 25–28.

8. Novakovich V.I. Prodol'nye sily pri vyveske rel'soshpal'noi reshetki besstykovogo puti [Longitudinal forces at the signboard of the rail-sleeper grating of the jointless track]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Union Scientific and Research Institute of Railway Transport], 1967, no. 6, pp. 49–52.

9. Novakovich V.I. O polzuchesti besstykovogo puti v poperechnom napravlenii pod deistviem prodol'nykh sil [On the creep of a jointless track in the transverse direction under the action of longitudinal forces]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Union Scientific and Research Institute of Railway Transport], 1976, no. 5, pp. 39–42.

10. Kogan A.Ya., Grishchenko V.A., Kosenyuk V.K. Ustoichivost' besstykovogo puti pri temperaturnom vozdeistvii [Stability of a joint-less track under temperature influence]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Obespechenie nadezhnosti i effektivnosti besstykovogo puti v slozhnykh usloviyakh ekspluatatsii»* [Interuniversity proceedings «Ensuring reliability and efficiency of a joint-less track in difficult operating conditions»]. Novosibirsk, 1991, pp. 5–15.

11. Kogan A.Ya., Grishchenko V.A. Nelineinaya ustoichivost' besstykovogo puti v pryamykh uchastkakh pri naikhudshei forme nachal'noi nenapryazhennoi nerovnosti [Nonlinear stability of a jointless track in straight sections with the worst form of initial unstressed unevenness]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Russian Scientific and Research Institute of Railway

Transport], 1992, no. 3, pp. 40–45.

12. Kogan A.Ya. Prodol'nye sily v zhelezodorozhnom puti [Longitudinal forces in the railway track]. Moscow: Transport Publ., 1967. 168 p.

13. Kogan A.Ya., Lebedev A.V. Ustoichivost' besstykovogo puti pri razlichnykh konstruktivnykh skrepleni i usloviyakh ikh ekspluatatsii [Stability of the joint-less track under various structures with fasteners and their operating conditions]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Russian Scientific and Research Institute of Railway Transport], 2007, no. 2, pp. 3–9.

14. Verigo M.F. Novye metody v ustanovlenii norm ustroystva i sodержaniya besstykovogo puti [New methods in the establishment of standards for the device and maintenance of a seamless track]. Moscow: Intekst Publ., 2000. 184 p.

15. Abdurashitov A.Yu., Ovchinnikov D.V., Sychev V.P., Sycheva A.V. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rel'sov pri razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii na osnove modelirovaniya metodom konechnykh elementov [Evaluation of the stress-strain state of rails under various operating conditions based on modeling of finite element methods]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of the Transsib], 2023, no. 1 (53), pp. 62–73.

16. Ovchinnikov D.V. 3D-modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov puti [3D-modeling of the stress-strain state of track elements], *Zhelezodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no. 3, pp. 50–53.

17. Ovchinnikov D.V., Gall'yamov D.I. Evaluation of Rail Overtipping under the Influence of Lateral Forces by Mathematical Modeling // *Transportation Research Procedia : Proceedings of the XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability*. Irkutsk, 2022, pp. 717–725.

18. Koven'kin D.A., Sulemina A.E., Pokatskii V.A. Otsenka zony vliyaniya bokovogo vozdeystviya podvizhnogo sostava na rel'soshpal'nyu reshetku [Assessment of the zone of influence of lateral impact of rolling stock on the rail-sleeper grid]. *Sbornik nauchnykh trudov «Problemy putevogo khozyaistva Vostochnoi Sibiri»* [Proceedings «Problems of the track facilities of Eastern Siberia»]. Irkutsk, 2004, vol. 2, pp. 71–74.

19. Koven'kin D.A. Issledovanie vozdeystviya summarnykh bokovykh sil na elementy verkhnego stroeniya puti pri vpisyvanii ekipazha v krivye uchastki puti [Investigation of the impact of total lateral forces on the elements of the upper structure of the track when fitting equipment into curved sections of the track]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy izyskani, proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii rossiiskikh zheleznykh dorog»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and practical conference «Problems and prospects of research, design, construction and operation of Russian railways»]. Irkutsk, 2007, vol. 1, pp. 23–26.

#### Информация об авторах

**Овчинников Дмитрий Владиславович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Управления научных работ, Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара; e-mail: ovchinnikov@samgups.ru.

#### Information about the authors

**Dmitrii V. Ovchinnikov**, Ph.D. in Engineering Science, Senior Researcher of the Department of Scientific Works, Samara State Transport University, Samara; e-mail: ovchinnikov@samgups.ru.

## Исследование газодинамических процессов в электропневматических тормозах на электропоезде ЭД9М

А.А. Корсун✉

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

✉korsunanton1998@gmail.com

### Резюме

В процессе разработки алгоритма адаптивного управления тормозным нажатием колодок пассажирского подвижного состава при электропневматическом торможении возникла необходимость учесть протекающие в тормозной системе газодинамические процессы. Для этого в моторвагонном депо «Иркутск» был проведен эксперимент на электропоезде ЭД9М во время стоянки с применением специального цифрового оборудования. В ходе эксперимента выполнено некоторое количество циклов торможения с целью выявления задержки между подачей управляющего воздействия краном машиниста и началом наполнения тормозного цилиндра или его разрядкой, также выявлено количество возможных ступеней разрядки тормозного цилиндра при ручном управлении электропневматическими тормозами для уточнения алгоритма адаптивного торможения. Датчики давления подключались в семи точках тормозной системы: тормозной цилиндр, ложный тормозной цилиндр, рабочая камера воздухораспределителя, питательный и запасный резервуары, питательная магистраль, тормозная магистраль. Сигнал с датчиков давления поступал в устройство регистрации и сохранения данных. Момент начала подачи управляющего воздействия в электропневматическую тормозную систему путем перевода ручки крана машиниста в положения «отпуск», «перекрышка» и «торможение», фиксировался датчиками света, установленными на лампах перекрыша и торможение на панели управления в кабине машиниста. В результате эксперимента подтверждена возможность применения алгоритма адаптивного торможения при управлении электропневматическими тормозами в части их быстродействия и управляемости.

### Ключевые слова

моторвагонный подвижной состав, тормозная система, газодинамические процессы, датчик давления, регистратор аналоговых сигналов, алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием

### Для цитирования

Корсун А.А. Исследование газодинамических процессов в электропневматических тормозах на электропоезде ЭД9М / А.А. Корсун // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 123–133. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).123-133.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 21.11.2023 г.; поступила после рецензирования: 24.11.2023 г.; принята к публикации: 27.11.2023 г.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по государственной работе «Адаптивная система автоматического управления с повышенной эффективностью тормозами пассажирских и высокоскоростных поездов» № 121050600026-9 от 06.05.2021.

## Research of gas dynamic processes in electro pneumatic brakes on an electric train ED9M

А.А. Korsun✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉korsunanton1998@gmail.com

### Abstract

In the process of developing an algorithm for adaptive control of pushing the braking pads of passenger rolling stock during electro-pneumatic braking, it became necessary to take into account the gas-dynamic processes occurring in the braking system. For this, an experiment was conducted at the Irkutsk motor wagon depot on the ED9M electric train during its parking using special digital equipment. In the course of the experiment, a certain number of braking cycles were performed in order to identify delays between the supply of the control action by the driver's crane and the beginning of filling the brake cylinder or its discharge, the number of possible stages of discharge of the brake cylinder with manual control of electro-pneumatic brakes was also revealed to clarify the adaptive braking algorithm. Pressure sensors were connected at seven points of the brake system: in the brake cylinder, false brake cylinder, working chamber of the air distributor, feed and spare tanks, feed line and brake line. The signal from the pressure sensors was sent to the data recording and storage device. The moment the control action was applied to the electro-pneumatic braking system by transferring the

driver's crane handle to the release, overlap and braking positions was recorded by light sensors installed on the overlap and braking lamps on the control panel in the driver's cabin. As a result of the experiment, the possibility of using an adaptive braking algorithm for controlling electropneumatic brakes was confirmed in terms of their speed and controllability.

### Keywords

motor wagon rolling stock, braking system, gas dynamic processes, pressure sensor, analog signal recorder, adaptive brake control algorithm

### For citation

Korsun A.A. Issledovanie gazodinamicheskikh protsessov v elektropnevmaticheskikh tormozakh na elektropoezde ED9M [Research of gas dynamic processes in electro pneumatic brakes on an electric train ED9M]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 123–133. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).123-133.

### Article Info

Received: November 21, 2023; Revised: November 24, 2023; Accepted: November 27, 2023.

### Acknowledgement

The work was carried out within the framework of the state task for the state work «Adaptive automatic control system with increased efficiency of passenger and high-speed train brakes» No. 121050600026-9 dated 6 May, 2021.

### Введение

В настоящее время компания ОАО «РЖД» сталкивается с проблемой падения участковой скорости, вследствие чего значительно снижается ее прибыль. Одним из параметров, влияющих на участковую скорость движения поездов, является эффективность тормозов [1]. В предыдущих работах были предложены алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием и устройство для его реализации, позволяющие сократить тормозной путь пассажирских поездов и электропоездов при управлении электропневматическими тормозами (ЭПТ), а также значительно снизить вероятность заклинивания колесных пар и образования ползунов. Принцип адаптивного управления тормозами на основе программной адаптации рассмотрен в [2] и построен на основании формул, представленных в [3] и иной научной литературе. За рубежом ученые исследуют в основном системы текущей адаптации, работающие в условиях неопределенности и предусматривающие наличие обратной связи по параметру частоты вращения колесной пары [4].

Для того чтобы обеспечить торможение поезда с постоянным коэффициентом запаса по нажатию в полуавтоматическом и автоматическом режимах работы, разработанное устройство должно выполнять управление сжатым воздухом в тормозных цилиндрах (ТЦ) с высокой точностью [5]. С точки зрения теории автоматического управления для решения поставленной задачи необходимо определить передаточную функцию звеньев системы ЭПТ.

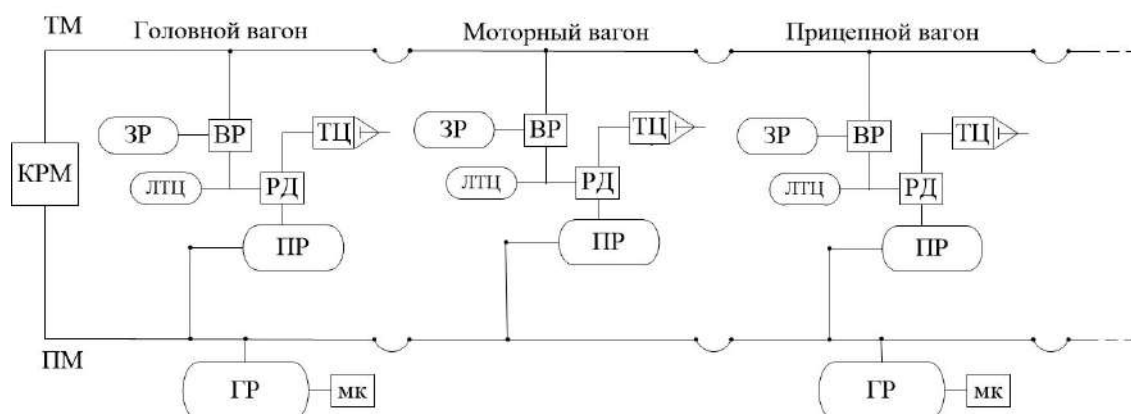
Нужно установить влияние инерции пневматических процессов, создающих задержки отклика тормозов на управляющие воздействия. Целью данной статьи является демонстрация проведенного эксперимента на электропоезде ЭД9М по исследованию газодинамических процессов, протекающих в тормозной системе при управлении ЭПТ. Далее в данной статье будут рассмотрены метод проведения эксперимента и частично приведены полученные результаты.

### Описание особенностей конструкции тормозной системы электропоезда ЭД9М

Современный моторвагонный подвижной состав оборудован пневматической тормозной системой с повторителями, питающимися от питательной магистрали (ПМ) (рис. 1) [6–9].

Использование такой системы повышает тормозную эффективность электропоезда, благодаря ее быстрдействию и неистощимости питательных и главных резервуаров на каждом вагоне электропоезда. Данная система схожа с двухтрубной тормозной системой, которая подразумевает использование питательной магистрали вдоль всей длины поезда параллельно тормозной для питания запасных резервуаров. Анализ эффективности использования двухтрубной тормозной системы более подробно описан в [10].

Отличительной особенностью тормозной системы электропоездов от тормозной системы пассажирских поездов с локомотивной тягой является питание ТЦ через повторители из ПМ, которая обеспечивает более интенсивную



**Рис. 1.** Упрощенная схема питания тормозов электропоезда ЭД9М сжатым воздухом  
**Fig. 1.** Simplified scheme for feeding the brakes of the ED9M electric train with compressed air

подачу сжатого воздуха при торможении из главных резервуаров, установленных на прицепных и моторных вагонах электропоезда. Наличие повторителей и реле давления (РД) в электропоездах позволяет ускорить работу тормозов и снизить их истощимость при циклических торможениях. Также в тормозной системе электропоезда присутствует ложный тормозной цилиндр (ЛТЦ) объемом семь литров (дополнительный резервуар), соединенный с воздухораспределителем, он необходим для обеспечения работы воздухораспределителя и пневматического реле. Наличие ЛТЦ влияет на инерционность процессов при торможении, что также является предметом исследования в рамках данной статьи. Воздухораспределитель (ВР) имеет значительное время перехода между положениями, а суммарный объем камеры и трубопроводов очень мал, поэтому, с учетом принципа действия ВР № 292 и № 242, без ЛТЦ происходило бы полное служебное торможение или полный отпуск тормозов. Это связано с зависимостью давления ТЦ от его объема в непосредственно тормозах. ЛТЦ дает возможность использовать ступенчатое регулирование сжатого воздуха в камере и через РД в ТЦ. Постоянный объем ЛТЦ позволяет более точно регулировать давление в ТЦ и обеспечивать минимизацию утечек критичных при истощимых тормозах, применяемых на электропоездах. Важно отметить, что величина давления сжатого воздуха в питательной и тормозной магистралях, а также максимальное давление в ТЦ электропоезда отличается от величины давления данных объемов в пассажирских поездах с локомотивной тягой. Так, макси-

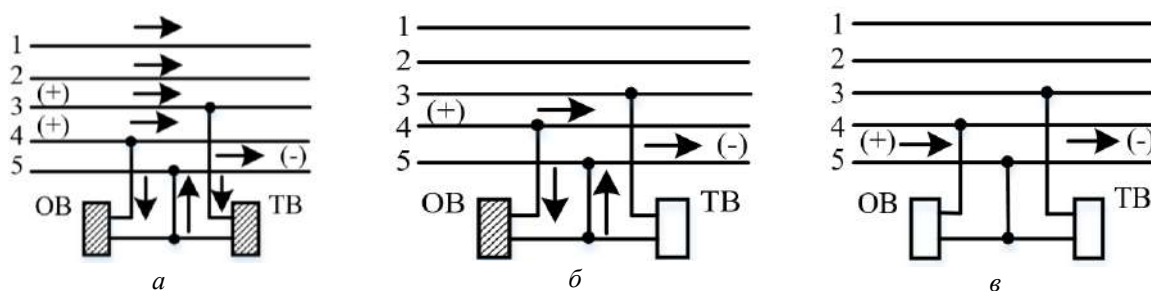
мальное давление в ТЦ на электропоезде ЭД9М составляет 0,34 МПа, а в поездах с локомотивной тягой оно равняется 0,4 МПа, в ТМ электропоезда давление составляет 0,45 МПа, а в пассажирских поездах с локомотивной тягой 0,48–0,5 МПа.

Принцип работы пневматической тормозной системы можно описать следующим образом. Мотор-компрессор (МК) заполняет главный резервуар (ГР) сжатым воздухом. По ПМ сжатый воздух попадает в главный орган управления тормозной системы – кран машиниста (КРМ). КРМ осуществляет управление тормозами за счет изменения давления в тормозной магистрали (ТМ). После этого вступает в работу ВР, который соединяет ТМ с запасным резервуаром (ЗР), и ЛТЦ, они контролируют давление сжатого воздуха между ЗР и ТЦ. Снижение давления в ТМ приводит к срабатыванию тормозов, а повышение к их отпуску [2].

ЭПТ на электропоезде также имеет отличия от ЭПТ на пассажирских поездах с локомотивной тягой. На электропоездах используется пятипроводная система, а на пассажирских поездах с локомотивной тягой – двухпроводная система ЭПТ.

Принцип действия ЭПТ можно описать с использованием схемы (рис. 2).

При реализации торможения напряжение (+50 В) подается в отпусковой 4 и тормозной 3 провода, а напряжение (–50 В) подается в обратный провод 5, что приводит к одновременному срабатыванию катушек отпускового и тормозного вентилей (ОВ и ТВ) электровоздухораспределителя № 305. При переводе ручки крана машиниста в положение 4 (перекрыша) снимается



**Рис. 2.** Структурная схема пятипроводного электропневматического тормоза на электропоезде:

*a* – действие схемы при торможении; *б* – действие схемы при перекрыши; *в* – действие схемы при отпуске

**Fig. 2.** The block diagram of a five-wire electro pneumatic brake on an electric train:

*a* – the action of the circuit when braking; *b* – the action of the circuit when overlapping; *c* – the action of the circuit when releasing

напряжение с обоих вентилях. Контроль целостности по обратному проводу 5 обеспечивается при всех процессах работы схемы (торможение, перекрыша и отпуск), контроль целостности остальных проводов происходит только при торможении. Провод 1 является контрольным. При торможении наличие давления в ТЦ контролируется с помощью сигнального провода 2. Таким образом, при реализации режима «торможение» используются все пять линейных проводов, при режиме «перекрыша» ток протекает по отпусковому 4 и обратному 5 проводу, а при отпуске только по обратному 5 проводу [7].

На основе проведенного анализа особенностей тормозной системы электропоезда можно сделать вывод, что для определения инерционности тормозной системы в ходе эксперимента необходимо отслеживать изменение давления в следующих устройствах и объемах: рабочая камера воздухораспределителя № 305, ложный тормозной цилиндр, тормозной цилиндр, питательный и запасный резервуары, тормозная и питательная магистрали. Существует три вида вагонов в моторвагонном подвижном составе – прицепной головной, промежуточный прицепной и моторный. Так как электропоезд, на котором проводился эксперимент, состоял из четырех вагонов – два прицепных головных и два промежуточных моторных, датчики были установлены в каждый тип вагона, в первый – прицепной головной, в третий – промежуточный моторный. Для фиксации момента подачи управляющего воздействия в электрическую цепь ЭПТ необходимо контролировать реле или световые индикаторы, расположенные на панели управления в кабине машиниста, с обязательной синхронизацией с остальными газодинамиче-

скими процессами, протекающими в тормозной системе.

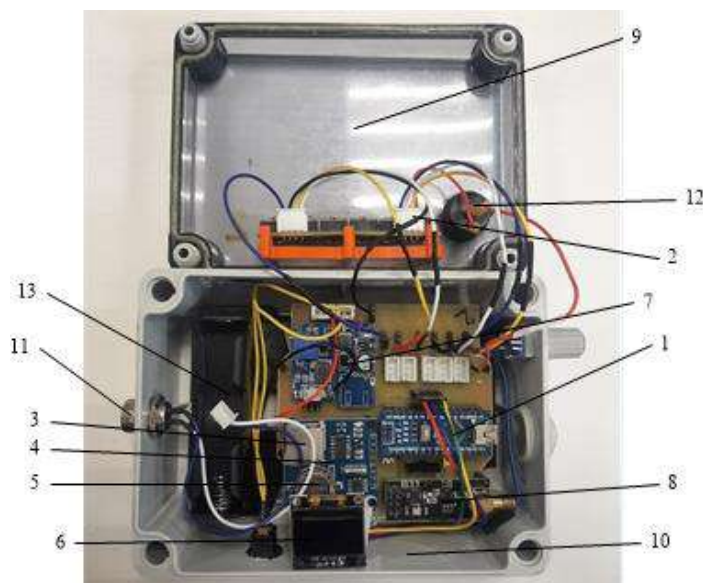
### Описание хода эксперимента

Эксперимент проводился в парке моторвагонного депо на электропоезде ЭД9М.

Как уже говорилось, целью эксперимента являлось исследование газодинамических процессов тормозной системы, а именно: определение времени отпуска тормозов, времени заполнения воздухом тормозных цилиндров, измерение задержек в срабатывании тормозной системы при переходе из одного режима работы в другой (зарядка / отпуск, перекрыша, торможение).

Для проведения эксперимента использовались 13 датчиков давления сжатого воздуха с максимальным измеряемым давлением 2,4 МПа, подключенные к регистраторам аналоговых сигналов с установленным в них съемным накопителем данных. Используемые датчики давления работают на основе пьезоэлементов [11]. В качестве вычислителя устройства использовался микроконтроллер с встроенными АЦП, время между опросами датчиков давления составляло 0,1 с. Блок регистрации является автономным и в течение эксперимента питался от аккумулятора. Всего было использовано три регистратора.

Сигнал с датчиков давления поступает на вход аналоговых сигналов регистратора 2. Затем микроконтроллер 1, который с помощью встроенного АЦП и разработанного программного кода (рис. 4), преобразует его в цифровой сигнал и через модуль регистрации 4 записывает на SD-карту 3 в виде CSV-файла для возможности дальнейшей работы в программе Microsoft Excel. На модуле регистрации также установлен мо-



**Рис. 3.** Регистратор аналоговых сигналов:

- 1 – микроконтроллер Arduino; 2 – вход аналоговых сигналов; 3 – съемный носитель информации в виде SD-карты; 4 – модуль регистрации данных; 5 – модуль часов реального времени; 6 – дисплей; 7 – DC-DC-преобразователь; 8 – радиомодуль; 9 – крышка; 10 – корпус; 11 – универсальный вход; 12 – кнопка включения; 13 – гнездо для литий-ионного аккумулятора

**Fig. 3.** Analog Signal Recorder:

- 1 – arduino microcontroller; 2 – analog signal input; 3 – removable storage medium in the form of an SD-card; 4 – data logging module; 5 – real-time clock module; 6 – display; 7 – DC-DC-converter; 8 – radio module; 9 – cover; 10 – box; 11 – universal input; 12 – power button; 13 – socket for lithium-ion battery

дуль часов реального времени 5 для синхронизации записи графиков на всех устройствах, для удобства контроля процесса работы устройств текущие показания давления с датчиков выводятся на дисплей 6 сетки. На каждый вагон приходился один регистратор сигналов, при этом на головном вагоне к регистратору были подключены фотодатчики, закрепленные на лампах торможения и перекрыши, чтобы фиксировать процесс подачи управляющих воздействий от крана машиниста в электрическую часть ЭПТ.

После подключения оборудования к тормозной системе электропоезда с помощью крана машиниста № 395 были приведены в действия тормоза поезда. Для осуществления полного служебного электропневматического торможения кран переводили в положение VЭ до момента достижения максимальной величины давления ТЦ, равной 0,34 МПа. Затем ручка КРМ переводилась в положение перекрыши – IV, чтобы зафиксировать установленное давление сжатого воздуха в ТЦ. Далее ручка КРМ переводилась в поездное положение II до достижения полного отпуска ТЦ. Также в ходе эксперимента исследовались ступенчатые тор-

можения и ступенчатый отпуск. Для повышения давления осуществлялись кратковременные переводы ручки КРМ в положение VЭ с возвратом в IV положение – перекрыши. Использовались ступени величиной от 0,02 до 0,16 МПа, уменьшающиеся по мере роста давления в ТЦ. Всего осуществлялось пять-шесть ступеней при торможении в то время, как при отпуске их количество достигало десяти, где каждая имела величину от 0,09 до 0,01 МПа, в данном случае прослеживалась прямая зависимость – чем выше величина исходного давления в ТЦ перед его разрядкой, тем выше скорость процесса снижения давления. Разрядка осуществлялась кратковременным переводом крана во II положение, а фиксация величины давления в ТЦ положением IV.

Во время эксперимента показания давления сжатого воздуха в основных объемах системы записывались на съемный носитель данных, установленный в регистраторе аналоговых сигналов, с привязкой к реальному времени для возможности сравнительного анализа скорости процессов внутри системы при разных положениях и величинах давления.



```

Файл Правка Скетч Инструменты Помощь
proverka_Analog_time.ino OLED com eeprom izm sd time
long sum[6]; //

void izm_work() {
  int izm[6];
  izm[0] = analogRead(A0);
  izm[1] = analogRead(A1);
  izm[2] = analogRead(A2);
  izm[3] = analogRead(A3);
  izm[4] = analogRead(A6);
  izm[5] = analogRead(A7);

  for (int i = 0; i < 6; i++) {
    sum[i] += izm[i] * 10;
  }
  chet++;
  // delay(5);
}

void izm_usred(){
  for (int i = 0; i < 6; i++) {
    data[i] = my_round(sum[i] / chet);
    sum[i] = 0;
  }
  chet = 0;
}

int my_round(long x) {
  int result;
  if (x % 10 >= 5) result = x / 10 + 1;
  else result = x / 10;
  return result;
}

```

**Рис. 4.** Программный код, преобразующий аналоговые сигналы в цифровые, написанный в программной среде микроконтроллера Arduino

**Fig. 4.** Program code that converts analog signals to digital, written in the software environment of the Arduino microcontroller

### Результаты эксперимента

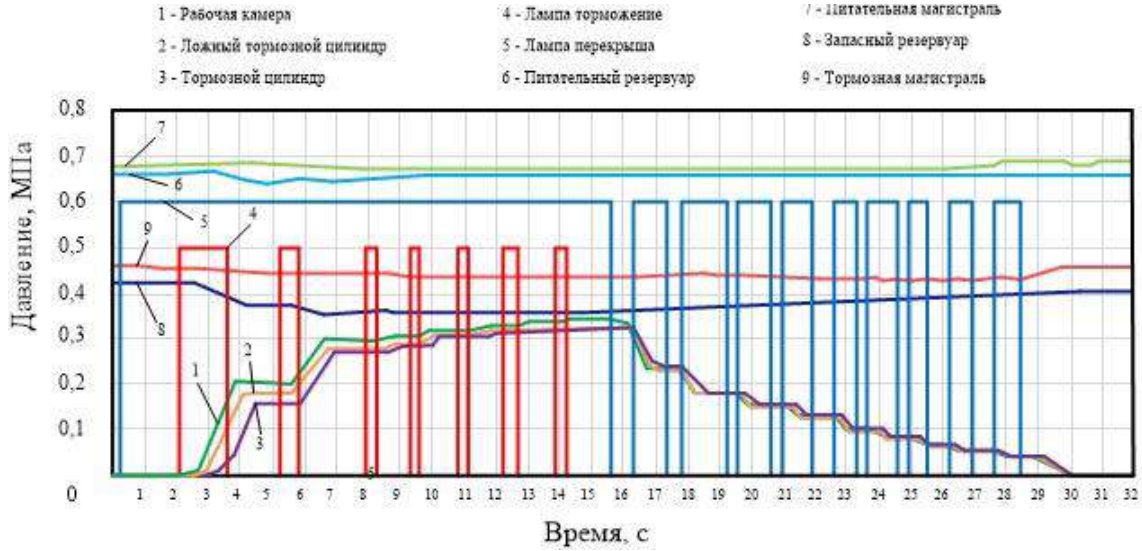
Полученные экспериментальные данные, записанные на SD-карту, были загружены в программную среду Microsoft Excel для дальнейшей обработки. В результате были получены графики торможения разными способами. Один из циклов торможения и отпуска приведен на рис. 5, на котором графики срабатывания сигнальных ламп и графики изменения давления в ключевых объемах тормозной системы совмещены на одной координатной плоскости. На рис. 5 наглядно видно, что торможение и отпуск осуществились ступенчато. Именно инерционность работы ЭПТ при ступенчатых торможениях и отпусках важно учитывать при разработке алгоритма адаптивного управления нажатием. Данные графики построены на основе показаний датчиков давления, установленных на прицепном головном вагоне.

На рис. 6, 7 приведены графики с обозначением задержек между подачей управляющего воздействия крана машиниста в V положении и

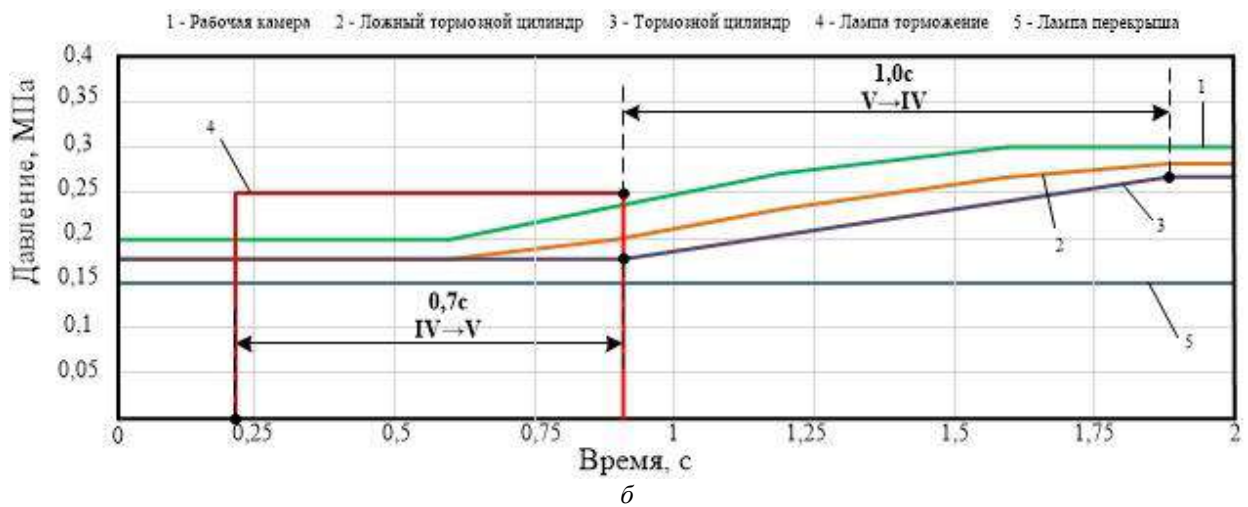
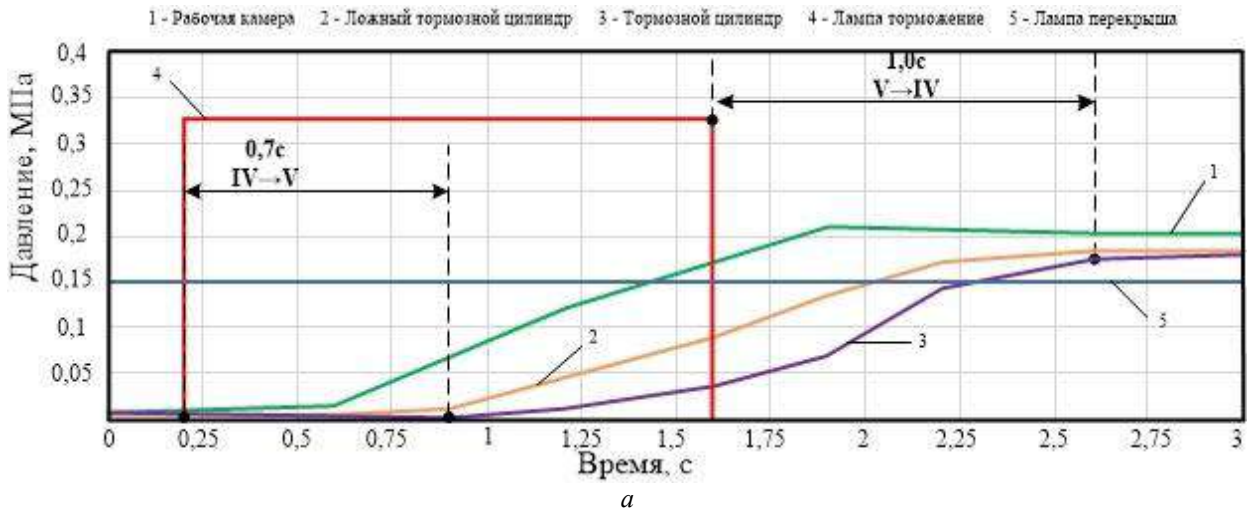
началом наполнения тормозного цилиндра, а также прекращением подачи управляющего воздействия в V положения и переводом ручки крана машиниста в IV положение перекрыши и моментом достижения установившегося давления сжатого воздуха в тормозном цилиндре.

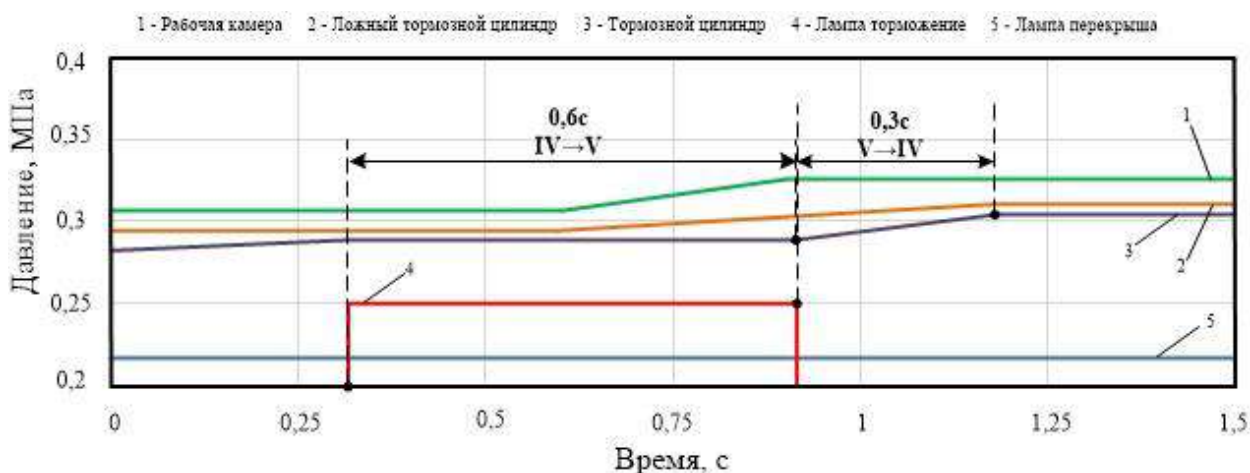
Из графика видно, что процесс торможения занял 6 с. Давление сжатого воздуха в ТЦ, ЛТЦ и рабочей камере воздухораспределителя достигло значения 0,305, 0,31 и 0,33 МПа соответственно. Время от подачи управляющего воздействия до момента начала газодинамических процессов в ТЦ составляет 0,7, 0,7 и 0,6 с в первой, второй и третьей ступени соответственно. Время между прекращением подачи управляющего воздействия и фиксацией давления в ТЦ составляет 1, 1, 0,3 с в первой, второй и третьей ступени соответственно.

Таким же образом можно рассмотреть и процесс отпуска тормозов, что является основным объектом наблюдения в этом эксперименте, рис. 7.



**Рис. 5.** Общий вид полного цикла торможения с применением алгоритма адаптивного управления тормозным нажатием  
**Fig. 5.** General view of the full braking cycle using the adaptive brake control algorithm





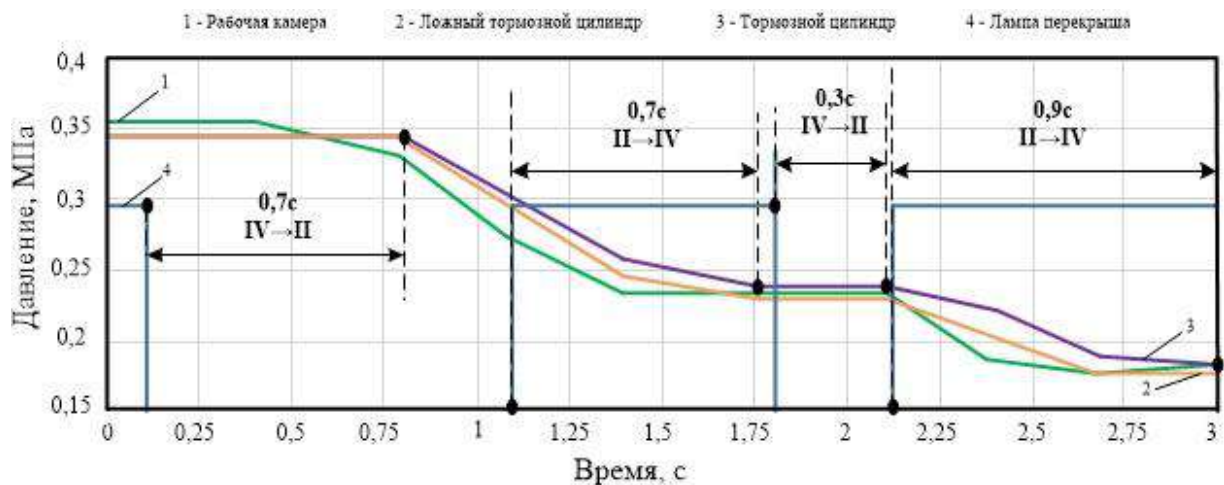
в

**Рис. 6.** Задержки, возникающие в тормозной системе при осуществлении ступенчатого наполнения тормозного цилиндра сжатым воздухом:

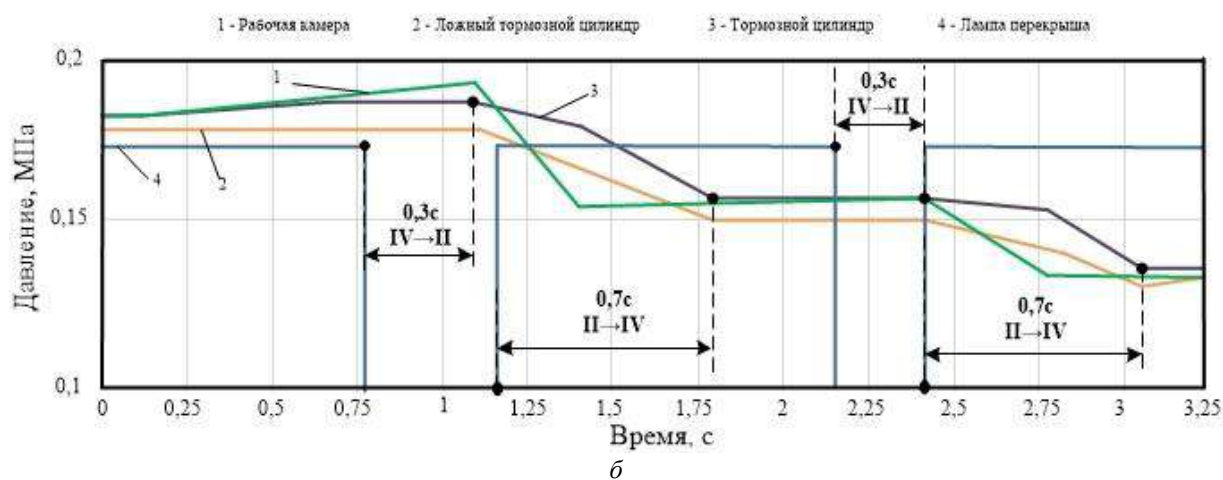
*a* – начало торможения; *б* – вторая ступень торможения; *в* – третья ступень торможения

**Fig. 6.** Delays occurring in the braking system during the implementation of stepwise filling of the brake cylinder with compressed air:

*a* – the beginning of braking; *b* – the second stage of braking; *c* – the third stage of braking



а



б

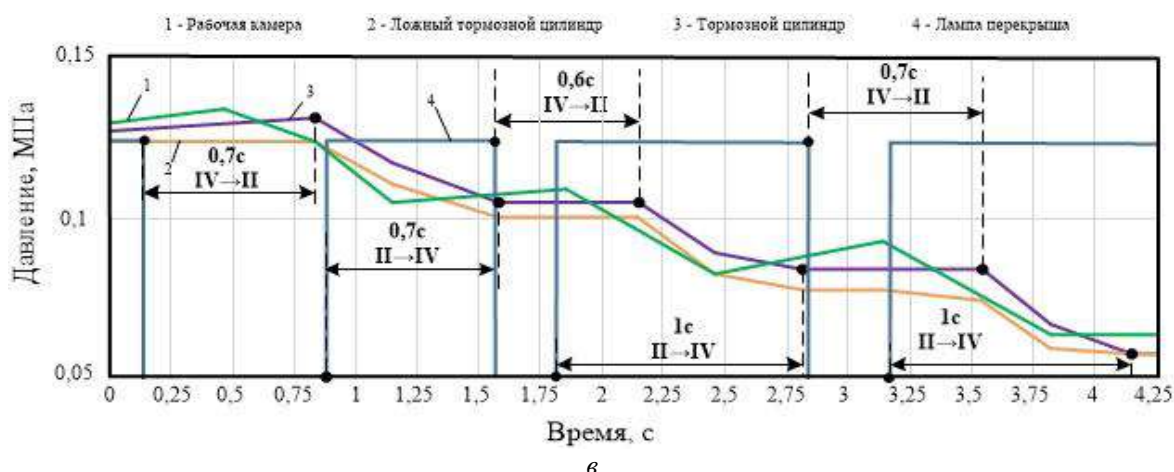


Рис. 7. Задержки, возникающие в тормозной системе при осуществлении ступени разрядки тормозного цилиндра:

*a* – первый интервал ступеней отпуска; *b* – второй интервал ступеней отпуска;  
*c* – третий интервал ступеней отпуска тормозов

Fig. 7. Delays occurring in the brake system during the discharge stage of the brake cylinder:

*a* – the first interval of the release stages; *b* – the second interval of the release stages;  
*c* – the third interval of the brake release stages

При ручном управлении удалось обеспечить отпуск в семь ступеней, что позволит выполнить алгоритм адаптации по скорости, значительно снизит вероятность заклинивания колесной пары и сократит тормозной путь. В процессе отпуска также выявлены задержки 0,7, 0,3, 0,3, 0,7, 0,6, 0,7 с между прекращением действия управляющего сигнала IV положения и началом разрядки ТЦ. Задержки между подачей управляющего воздействия IV положения и фиксацией давления в ТЦ составили 0,7, 0,9, 0,7, 0,7, 0,7, 1, 1 с.

Полученные результаты позволяют скорректировать алгоритм таким образом, чтобы обеспечить точное управление тормозной системой в процессе адаптивного торможения.

Устройство адаптивного управления тормозным нажатием должно выполнять проверку соответствия фактического и целевого давлений, которые должны находиться в установленных пределах. В случае возникновения разницы между фактическим и целевым значениями давления, превышающей установленные пределы, устройство выполнит дополнительную ступень отпуска либо торможения по необходимости.

## Заключение

По результатам экспериментальных исследований, представленных в данной публи-

кации, можно сделать вывод о наличии значимой при построении алгоритма временной задержке между управляющими воздействиями и откликом тормозной системы. Значимыми численными параметрами тормозной системы, полученными в результате исследования, стали средняя величина задержки времени при переводе ЭПТ из режима перекрыши в режим отпуска, составившая 0,7–0,9 с, при переходе ЭПТ из режима отпуска ТЦ в режим перекрыши задержка времени составила 0,25–0,35 с. Параметры задержки срабатывания для процесса торможения несколько отличаются от параметров отпуска. Так, среднее время задержки при переходе ЭПТ из режима зарядки и отпуска или перекрыши в режим торможения составило 0,7 с, что в целом схоже с режимом отпуска. При этом задержка при переходе из режима торможения в режим перекрыши составила 0,3–1 с, в среднем 0,77 с. Таким образом, при наполнении ТЦ процессы переключений элементов управления и исполнительных элементов имеют инерцию больше, чем при отпуске.

В последующих научных трудах планируются исследование газодинамических процессов, происходящих при экстренном торможении. Дальнейшее развитие исследований предполагает проведение поездного эксперимента на электропоезде ЭД9М, в ходе которого должна подтвердиться эффективность предлага-

емого алгоритма адаптивного управления тормозным нажатием при его реализации в ручном режиме на участке пути с нулевым уклоном. Также развитие получит и исследование по направлению влияния температуры на коэффи-

циент трения, которое не учитывается в существующих формулах при выполнении тормозных расчетов. Такие исследования проводятся как отечественными, так и зарубежными учеными [12–18].

### 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 14.11.2023).
2. Алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием пассажирского подвижного состава / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, А.А. Корсун и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2022. № 5. С. 6064.
3. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.16 № 867р (ред. 02.02.2018). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
4. Frea M., Tione R. Adaptive wheel slide protection algorithms. URL : [download.aspx?id=81470145-a0bc-4007-b100-75b39a0d6dbf](http://download.aspx?id=81470145-a0bc-4007-b100-75b39a0d6dbf) (Дата обращения 14.11.2023).
5. Универсальная система автоведения электровозов пассажирского движения. Руководство по эксплуатации // ООО «АВПТ Технологии» : сайт. URL : [https://avpt.ru/upload/RE\\_USAVPP.pdf](https://avpt.ru/upload/RE_USAVPP.pdf) (Дата обращения 14.11.2023).
6. Крылов В.П., Крылов В.В. Автоматические тормоза подвижного состава. М. : Транспорт, 1983. 360 с.
7. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава. М. : Маршрут, 2006. 392 с.
8. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России № 250 от 23.06.2022. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
9. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утв. Советом по ж.-д трансп. государств-участников Содружества : протокол от 6-7 мая 2014 г. № 60 (приложение № 18). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
10. Сравнительный анализ тормозных систем подвижного состава с однострубно и двухтрубно питанием / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, А.А. Хамнаева и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (79). С. 35–42.
11. Применение радиочастотного тракта для регистрации импульсных сигналов с пьезодатчика / О.В. Малышкина, С.И. Пугачев, С.О. Сегеда и др. // Морские интеллектуальные технологии. 2015. № 1-1(27). С. 49–53.
12. Исследование температуры тормозных колодок с разной степенью износа в процессе фрикционного торможения / П.Ю. Иванов, А. М. Худогов, Е. Ю. Дульский и др. // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (47). С. 27–34.
13. A methodology to predict thermomechanical cracking of railway wheel treads: from experiments to numerical predictions / A. Esmaili, M.S. Walia, K. Handa et al. // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 105. P. 71–85.
14. Hamdaoui A., Jaddi El.H. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 149. P. 1–4.
15. Tudor A., Radulescu C., Petre I. Thermal effect of the brake shoes friction on the wheel/rail contact // Tribology in industry. 2003. Vol. 25. P. 27–32.
16. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system // Heat Mass Transfer. 2009. Vol. 45. P. 1047–1059.
17. Schrader H.J. The friction of railway brake shoes at high speed and high pressure // University of Illinois bulletin. 1938. Vol. 35. No 72. URL : <https://core.ac.uk/download/pdf/4814283.pdf> (Дата обращения 14.11.2023).
18. Balotin J.G., Neis P.D., Ferreira N.F. Analysis of the influence of temperature on the friction coefficient of friction materials // ABCM Symposium Series in Mechatronics. 2010. Vol. 4. P. 898–906.

### 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 November 14, 2023).
2. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Korsun A.A., Osipov D.V. Algoritm adaptivnogo upravleniya tormoznym nazhatiem passazhirskogo podvizhnogo sostava [Algorithm of adaptive control by braking of passenger rolling stock]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific Information Proceeding], 2022, no. 5, pp. 60–64.
3. Rasporyazhenie ОАО «RZHD» ot 12.05.16 № 867r «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» (red. 02.02.2018) [Order of JSC «Russian Railways» dated May 12, 16 No 867r «On approval of the rules of traction calculations for train work» (ed. February 2, 2018)].
4. Frea M., Tione R. Adaptive wheel slide protection algorithms. URL : [download.aspx?id=81470145-a0bc-4007-b100-75b39a0d6dbf](http://download.aspx?id=81470145-a0bc-4007-b100-75b39a0d6dbf) (Accessed November 14, 2023).
5. Universal'naya sistema avtovedeniya elektrovozov passazhirskogo dvizheniya. Rukovodstvo po ekspluatatsii (elektronnyi resurs) [Universal system of wagon driving of electric locomotives of passenger traffic. Operation manual (electronic resource)]. Available at: [https://avpt.ru/upload/RE\\_USAVPP.pdf](https://avpt.ru/upload/RE_USAVPP.pdf) (Accessed November 14, 2023).
6. Krylov V.P., Krylov V.V. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava [Automatic brakes of rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1983. 360 p.

7. Asadchenko V.R. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava [Automatic brakes of rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 392 p.
8. Prikaz Mintransa Rossii № 250 ot 23.06.2022 «Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznnykh dorog Rossiiskoi Federatsii» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No 250 dated June 23, 2022 «On approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation»].
9. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva, protokol ot 6-7 maya 2014 g № 60 (prilozhenie № 18) [Rules for the maintenance of brake equipment and brake control of railway rolling stock : approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol no 60, dated May 6–7, 2014 (Annex no 18)].
10. Ivanov P.Yu., Dulskii E.Yu., Khamnaeva A.A., Korsun A.A., Treskin S.V. Sravnitel'nyi analiz tormoznykh sistem podvizhnogo sostava s odnotrubnym i dvukhtrubnym pitaniem [Comparative analysis of braking systems of rolling stock with single-tube and two-tube power supply]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2020, no. 3(79), pp. 35–42.
11. Malyshkina O.V., Pugachev S.I., Segeda S.O., Embil' I.A. Primenenie radiochastotnogo trakta dlya registratsii impul'snykh signalov s p'ezodatchika [Application of a radio frequency path for recording pulse signals from a piezo sensor]. *Morskije intellektual'nye tekhnologii* [Marine intelligent technologies], 2015, no. 1-1(27), pp. 49–53.
12. Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Dulskii E.Yu., Korsun A.A., Treskin S.V. Issledovanie temperatury tormoznykh kolodok s raznoi stepen'yu iznosa v protsesse friktsionnogo tormozheniya [Investigation of the temperature of brake pads with different degrees of wear during friction braking]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2020, no. 3(47), pp. 27–34.
13. Esmacili A., Walia M.S., Handa K., Ikeuchi K., Ekh M., Vernersson T., Ahlström J. A methodology to predict thermo-mechanical cracking of railway wheel treads: from experiments to numerical predictions. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 105, pp. 71–85.
14. Hamdaoui A., Jaddi El.H. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 149, pp. 1–4.
15. Tudor A., Radulescu C., Petre I. Thermal effect of the brake shoes friction on the wheel/rail contact. *Tribology in industry*, 2003, vol. 25, pp. 27–32.
16. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system. *Heat Mass Transfer*, 2009, vol. 45, pp. 1047–1059.
17. Schrader H.J. The friction of railway brake shoes at high speed and high pressure. *University of Illinois bulletin*, 1938, Vol. 35, no 72. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/4814283.pdf> (Accessed November 14, 2023).
18. Balotin J.G., Neis P.D., Ferreira N.F. Analysis of the influence of temperature on the friction coefficient of friction materials. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 2010, vol. 4, pp. 898–906.

#### Информация об авторах

**Корсун Антон Александрович**, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: korsunanton1998@gmail.com.

#### Information about the authors

**Anton A. Korsun**, Ph.D. Student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: korsunanton1998@gmail.com.

## Моделирование распределения тепловых полей на поверхностях трения композиционных тормозных накладок дисковых тормозов железнодорожного подвижного состава

С.В. Трескин✉, Д.О. Емельянов, П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский

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

✉sergei.tresckin@yandex.ru

### Резюме

В статье рассматривается важная роль скоростного и высокоскоростного подвижного состава в железнодорожном транспорте Российской Федерации. Для обеспечения необходимого уровня безопасности движения требуются тормозные системы с высокими характеристиками. К подобным тормозным системам относятся дисковые тормоза. Одним из решений, обеспечивающих нужные технические характеристики дисковых тормозов, является проведение компьютерного моделирования работы выбранного типа тормозного оборудования, в частности моделирования тепловых процессов, возникающих в ходе торможения. Указано, что дисковые тормоза больше всего подходят для скоростного и высокоскоростного подвижного состава, так как они обладают значительными техническими достоинствами. Выявлен основной недостаток стандартных колодочных тормозов локомотивов и вагонов. Отмечено, что следует учитывать температуру нагрева элементов трения в конструкции тормозов подвижного состава, так как от данного фактора зависит величина коэффициента трения и, следовательно, эффективность торможения. Рассмотрена конструкция и назначение важнейших элементов и узлов дисковых тормозов на примере электропоезда ЭС1 «Ласточка». Смоделированы в системе автоматизированного проектирования «Компас-3D» композиционные тормозные накладки с различной степенью износа для проведения дальнейшего исследования. Произведен расчет изменения коэффициента трения и тормозной силы в процессе торможения подвижного состава, оснащенного дисковыми тормозами. Согласно теории пропорциональности механической и тепловой мощности, выделяемой в ходе трения тормозных накладок о диск, определена плотность теплового потока. Установлены коэффициенты теплового потока как для тормозного диска, так и для тормозных накладок. Описан процесс конечно-элементного анализа в среде MSC Patran/Marc. Приведены результаты моделирования с иллюстрацией распределения тепловых полей на поверхностях трения тормозных накладок с различной степенью и формой износа. Сделаны выводы о влиянии износов на максимальную температуру нагрева тормозных накладок.

### Ключевые слова

подвижной состав, дисковые тормоза, тормозной диск, тормозные накладки, коэффициент трения, плотность теплового потока, конечно-элементный анализ, тепловое поле

### Для цитирования

Моделирование распределения тепловых полей на поверхностях трения композиционных тормозных накладок дисковых тормозов железнодорожного подвижного состава / С.В. Трескин, Д.О. Емельянов, П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 134–147. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).134-147.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 08.12.2023 г.; поступила после рецензирования: 22.12.2023 г.; принята к публикации: 25.12.2023 г.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по государственной работе «Адаптивная система автоматического управления с повышенной эффективностью тормозами пассажирских и высокоскоростных поездов» № 121050600026-9 от 06.05.2021.

## Modeling of thermal fields distribution on the friction surfaces of composite brake linings of railway rolling stock disk brakes

S.V. Treskin✉, D.O. Emel'yanov, P.Yu. Ivanov, E.Yu. Dul'skii

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉sergei.tresckin@yandex.ru

### Abstract

The article discusses the important role of express and high-speed rolling stock in the railway transport of the Russian Federation. High performance braking systems are required to ensure the needed level of traffic safety. Disc brakes belong to such braking

devices. One of the solutions providing the necessary technical characteristics of disc brakes is to conduct computer simulation of the operation of the selected type of braking equipment, in particular, modeling thermal processes during braking. It is indicated that disc brakes are among the most suitable for express and high-speed rolling stock, as they have significant technical advantages. The main drawback of standard brake pads for locomotives and wagons has been identified. The necessity is noted to take into account the heating temperature of the friction elements in the design of the brakes of rolling stock, since the value of the friction coefficient depends on this factor, and thus the braking efficiency. The design and purpose of the main elements and components of disc brakes are considered on the example of the electric train ES1 «Swallow». Composite brake linings with varying degrees of wear have been modeled in the KOMPAS-3D CAD for further research. The calculation of the change in the friction coefficient and braking force during braking of rolling stock equipped with disc brakes is carried out. According to the theory of proportionality of the mechanical and thermal power released during friction of the brake linings on the disc, the heat flux density is determined. The heat flux coefficients for both the brake disc and the brake linings are determined. The process of finite element analysis in the MSC Patran/Marc environment is described. The simulation results are presented with an illustration of the distribution of thermal fields on the friction surfaces of brake linings with different degrees and forms of wear. Conclusions are drawn about the effect of wear on the maximum heating temperature of the brake linings.

### Keywords

rolling stock, disc brakes, brake disc, brake linings, coefficient of friction, heat flux density, finite element analysis, thermal field

### For citation

Treskin S.V., Emel'yanov D.O., Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu. Modelirovanie raspredeleniya teplovykh polei na poverkhnostyakh treniya kompozitsionnykh tormoznykh nakladok diskovykh tormozov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Modeling of thermal fields distribution on the friction surfaces of composite brake linings of railway rolling stock disk brakes]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 134–147. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).134-147.

### Article Info

Received: December 8, 2023; Revised: December 22, 2023; Accepted: December 25, 2023.

### Acknowledgement

The work was carried out within the framework of the state task for the state work «Adaptive automatic control system with increased efficiency of passenger and high-speed train brakes» No. 121050600026-9 dated 6 May, 2021.

### Введение

На сегодняшний день в Российской Федерации идет активное развитие железнодорожного транспорта: расширяется сеть железных дорог, повышается грузоподъемность подвижного состава, внедряются в производство и эксплуатацию новые типы тягового и нетягового подвижного состава. Но наиболее технически сложными являются проекты по развитию скоростного и высокоскоростного железнодорожного движения. Однако социально-экономический эффект от реализации данных проектов позволит полностью компенсировать затраченные ресурсы [1–5].

В России скоростным считается движение подвижного состава со скоростью 161–200 км/ч, высокоскоростным – движение со скоростью свыше 200 км/ч.

Парк высокоскоростного железнодорожного подвижного состава в России представлен лишь электропоездом ЭВС «Сапсан», который является лицензированной копией немецкого поезда «Velaro». Более широко представлен скоростной подвижной состав. Активно производятся и эксплуатируются та-

кие скоростные электропоезда, как ЭС1 / ЭС1П / ЭС2Г / ЭС2ГП «Ласточка» (рис. 1), ЭГ2Тв и ЭГЭ2Тв «Иволга» и т.д.



Рис. 1. Электропоезд ЭС2Г «Ласточка»  
Fig. 1. Electric train ES2G «Swallow»

Значительной проблемой при проектировании и эксплуатации указанных типов подвижного состава является обеспечение необходимого уровня безопасности движения. Например, требуются тормозные средства с высокой эффективностью. Среди известных типов тормозов для скоростного и высокоско-



ростного подвижного состава наиболее подходят дисковые тормоза [6]. Однако высокие технические характеристики тормозных средств нужно закладывать на этапе их проектирования. В ходе процесса проектирования тормозных средств подвижного состава необходимо использовать компьютерное моделирование работы указанных средств.

Целью данной статьи является исследование тепловых процессов, происходящих при нагреве тормозной накладки в процессе торможения, путем проведения конечно-элементного анализа. Данный вид компьютерного моделирования позволит получить результат в виде распределения тепловых полей на поверхностях трения фрикционных элементов. Проведение подобных исследований необходимо, так как известно, что температура нагрева фрикционных элементов тормозных систем подвижного состава влияет на величину коэффициента трения и, следовательно, на эффективность торможения [7].

### Преимущества и недостатки дисковых тормозов

Конструктивной особенностью многих типов скоростного и высокоскоростного подвижного состава стало активное применение дисковых тормозов, имеющих определенные технические преимущества перед колодочными, которые являются стандартными для грузовых и пассажирских локомотивов и вагонов, обращающихся со скоростями до 140 км/ч. У стандартных колодочных тормозов есть недостаток, заключающийся в том, что при высоких начальных скоростях торможения на поверхность катания колеса воздействует большая термическая нагрузка, которая ведет к появлению на ней различных трещин и повреждений [8–11].

Основные преимущества дисковых тормозов:

1. При подборе рациональной пары трения возможно реализовать значительный по величине момент трения.
2. Применение дисковых тормозов позволяет исключить участие поверхности катания колеса в качестве поверхности трения во время срабатывания тормозов.
3. Реализуется более эффективное рассеяние тепловой энергии, выделяемой в ходе

торможения.

4. Тормозная рычажная передача обладает меньшей массой в сравнении с колодной.

Однако дисковые тормоза не лишены недостатков, к которым можно отнести:

- повышение массы колесных пар;
- высокая стоимость оборудования;
- сложность обслуживания и ремонта элементов и узлов дисковых тормозов;
- пониженный коэффициент сцепления, вызванный невозможностью очистки поверхности катания колеса от загрязнений.

В целом применение дисковых тормозов в конструкции скоростного и высокоскоростного подвижного состава является технически обоснованным решением.

### Конструкция дисковых тормозов

Применяемые конструкции дисковых тормозов на скоростном и высокоскоростном подвижном составе во многом сходны и включают следующие основные элементы:

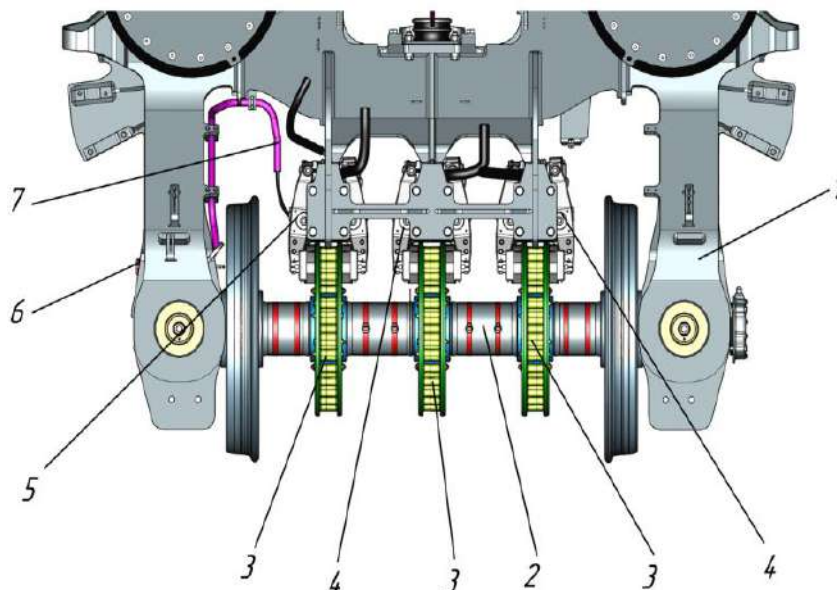
1. Два или три (в некоторых случаях четыре) напрессованных на ось тормозных дисков. В некоторых случаях тормозной диск может быть установлен в колесо тележки подвижного состава. Указанные элементы могут быть выполнены в виде сплошных или сборных чугунных или алюминиевых дисков.

2. Тормозные накладки, выполненные из металлокерамики или композиционных материалов.

3. Клещевые механизмы и тормозные цилиндры, предназначенные для осуществления процесса торможения.

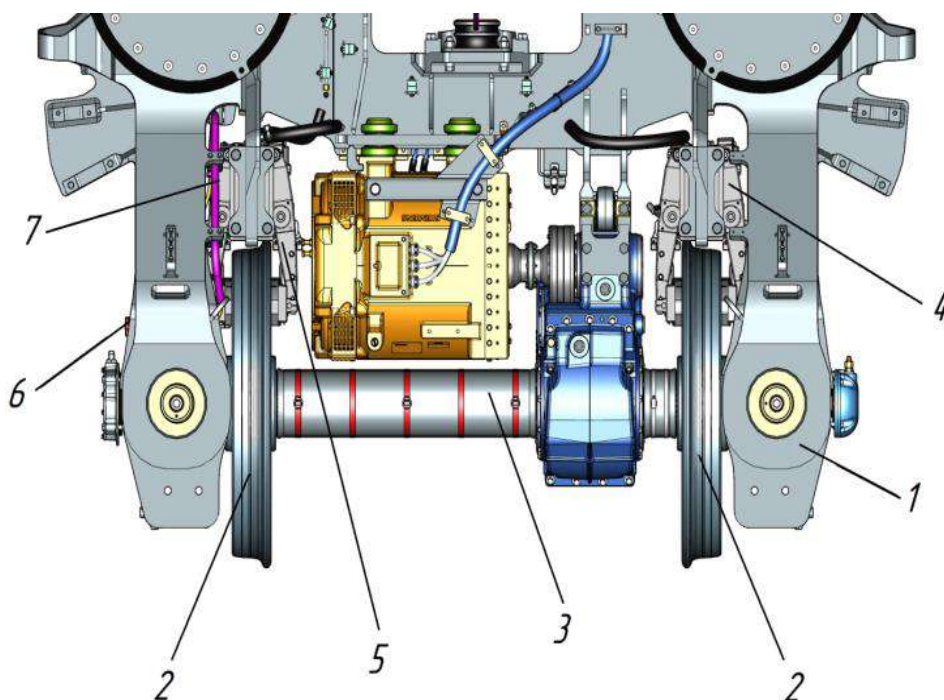
Различают две схемы конструктивного исполнения дисковых тормозов: для моторных и немоторных вагонов. У тележек моторного вагона дисковые тормоза располагаются на колесах из-за невозможности разместить тормозной диск на оси по причине расположения в этих местах тяговых электродвигателей. На рис. 2 и 3 приведены схемы расположения элементов дисковых тормозов на моторных и немоторных вагонах скоростного электропоезда ЭС1 «Ласточка».

Клещевые механизмы (тормозные блоки) для электропоезда ЭС1 «Ласточка» и их устройство приведены на рис. 4 и 5.



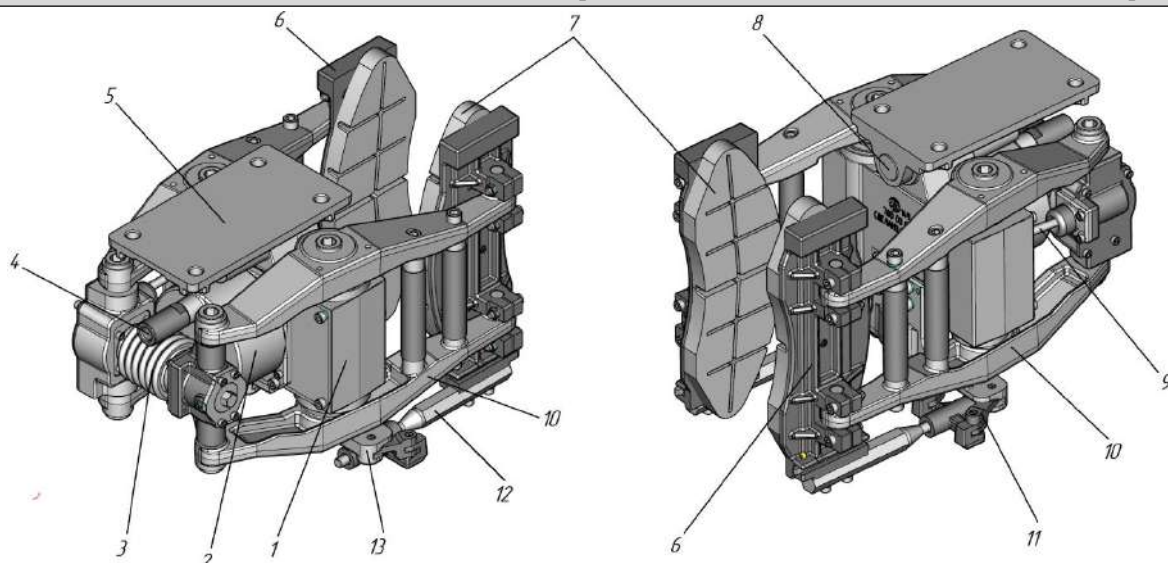
**Рис. 2.** Дисковые тормоза тележки немоторного вагона электропоезда ЭС1 «Ласточка»:  
 1 – рама тележки немоторного вагона; 2 – колесная пара; 3 – тормозные диски; 4 – тормозной блок 780.00.00.000-01; 5 – тормозной блок 780.00.00.000; 6 – рукоятка троса управления; 7 – трос управления

**Fig. 2.** Disc brakes of the non-motor wagon bogie of the electric train ES1 «Swallow»:  
 1 – bogie frame of a non-motor wagon; 2 – wheelset; 3 – brake discs; 4 – brake block 780.00.00.000-01;  
 5 – brake block 780.00.00.000; 6 – control cable handle; 7 – control cable



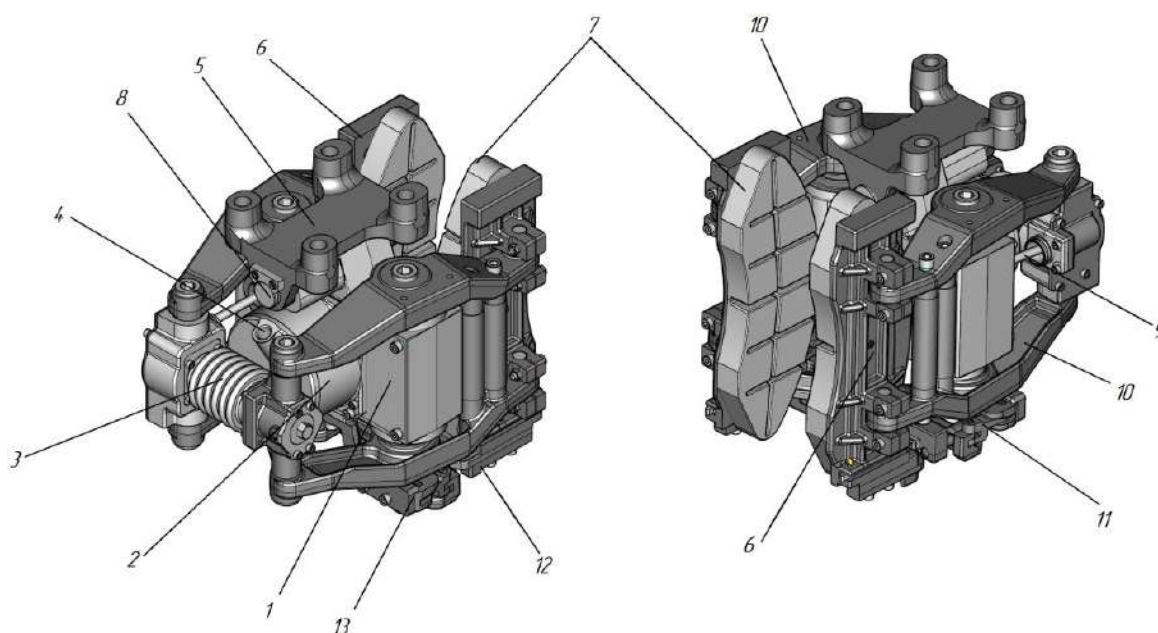
**Рис. 3.** Дисковые тормоза тележки моторного вагона электропоезда ЭС1 «Ласточка»:  
 1 – рама тележки моторного вагона; 2 – колесо с установленными тормозными дисками;  
 3 – ось колесной пары; 4 – тормозной блок 780.00.00.000-06; 5 – тормозной блок 780.00.00.000-05;  
 6 – рукоятка троса управления; 7 – трос управления

**Fig. 3.** Disc brakes of the motor wagon bogie of the electric train ES1 «Swallow»:  
 1 – motor car bogie frame; 2 – wheel with installed brake discs; 3 – wheel set axle; 4 – brake block 780.00.00.000-06;  
 5 – brake block 780.00.00.000-05; 6 – control cable handle; 7 – control cable



**Рис. 4.** Клепцовой механизм беспружинного стояночного тормоза 780.00.00.000-01:  
 1 – корпус; 2 – цилиндр автоматического тормоза; 3 – автоматический регулятор; 4 – штуцер подачи сжатого воздуха; 5 – подвес крепления; 6 – башмаки тормозных накладок; 7 – тормозные накладки; 8 – ось подвеса; 9 – нажимная штанга; 10 – н-образный рычаг клещевого механизма; 11 – рычаг; 12 – тяга; 13 – кронштейн корпуса

**Fig. 4.** Claw mechanism of springless parking brake 780.00.00.000-01:  
 1 – case; 2 – automatic brake cylinder; 3 – automatic regulator; 4 – compressed air supply fitting; 5 – mounting suspension; 6 – brake lining shoes; 7 – brake linings; 8 – suspension axis; 9 – pressure rod; 10 – n-shaped lever of the pincer mechanism; 11 – lever; 12 – traction; 13 – bracket of case



**Рис. 5.** Клепцовой механизм беспружинного стояночного тормоза 780.00.00.000-06:  
 1 – корпус; 2 – цилиндр автоматического тормоза; 3 – автоматический регулятор; 4 – штуцер подачи сжатого воздуха; 5 – подвес крепления; 6 – башмаки тормозных накладок; 7 – тормозные накладки; 8 – ось подвеса; 9 – нажимная штанга; 10 – н-образный рычаг клещевого механизма; 11 – рычаг; 12 – планка; 13 – кронштейн корпуса

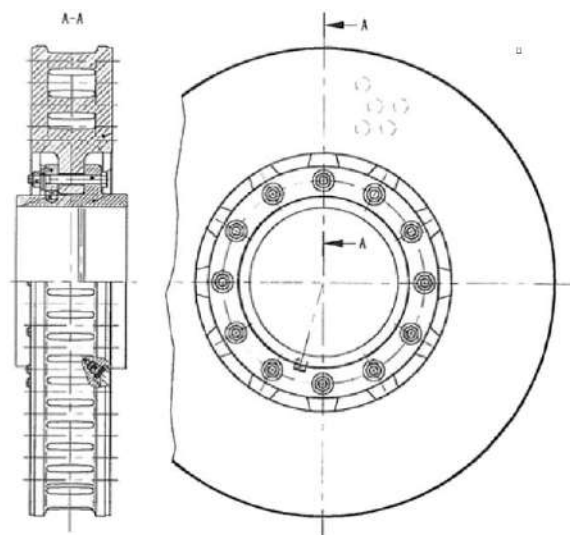
**Fig. 5.** Claw mechanism of springless parking brake 780.00.00.000-06:  
 1 – case; 2 – automatic brake cylinder; 3 – automatic regulator; 4 – compressed air supply fitting; 5 – mounting suspension; 6 – brake lining shoes; 7 – brake linings; 8 – suspension axis; 9 – pressure rod; 10 – n-shaped lever of the pincer mechanism; 11 – lever; 12 – bar; 13 – bracket of case

Главными элементами, реализующими тормозную силу, в дисковых тормозах являются тормозной диск и накладка. В электропоезде «Ласточка» используются композиционные тормозные накладки (рис. 6) и вентилируемые сборные тормозные диски (рис. 7).

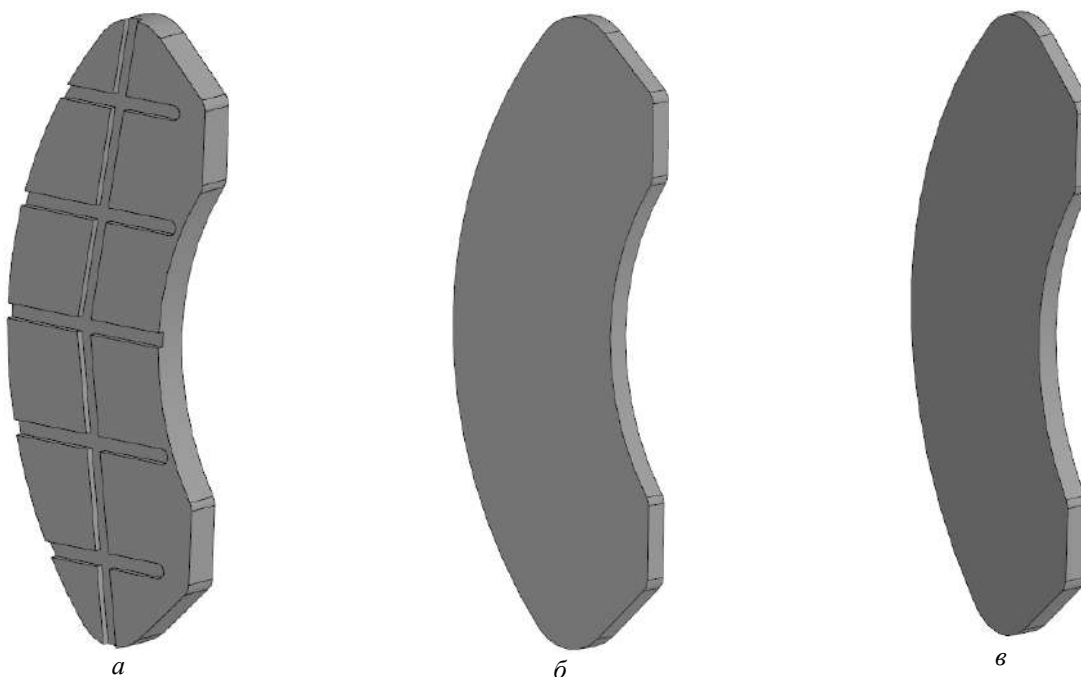


**Рис. 6.** Тормозная накладка дисковых тормозов, выполненная из композиционного материала  
**Fig. 6.** Disc brake lining, made of composite material

Для проведения компьютерного моделирования процесса нагрева тормозных накладок в процессе торможения в системе автоматизированного проектирования «Компас-3D» были разработаны три модели композиционной тормозной накладки с различными видами износа (рис. 8).



**Рис. 7.** Вентилируемый тормозной диск  
**Fig. 7.** Ventilated brake disc



**Рис. 8.** Твердотельные модели композиционных тормозных накладок, выполненные с помощью компьютерного моделирования:  
*a* – без износа; *b* – с равномерным износом; *c* – с клиновидным износом  
**Fig. 8.** Solid state models of composite brake linings, made using computer modeling:  
*a* – without wear; *b* – with uniform wear; *c* – with wedge-shaped wear

Толщина тормозной накладки составляет 25 мм, площадь ее поверхности, которая непосредственно взаимодействует с поверхностью трения тормозного диска, составляет 430 см<sup>2</sup>. Тормозная накладка в процессе эксплуатации изнашивается. Износ может быть как равномерный, так и клиновидный. В эксплуатации минимально допустимая толщина композиционной накладки составляет 5 мм. Клиновидный износ тормозных накладок не допускается. Модель тормозной накладки с равномерным износом имеет толщину 15 мм. Минимальная толщина накладки с клиновидным износом имеет аналогичную толщину.

### Моделирование процесса нагрева тормозных накладок

Для проведения конечно-элементного анализа нагрева колодок были проведены тормозные расчеты согласно Правилам тяговых расчетов для поездной работы (ПТР) [12]. Тормозная сила для дисковых тормозов определяется по формуле:

$$B_{\text{тд}} = \sum K \varphi_{\text{к}} \frac{r_{\text{д}}}{r_{\text{к}}}, \quad (1)$$

где  $K$  – сила нажатия на одну тормозную наладку, кН;  $\varphi_{\text{к}}$  – коэффициент трения накладки;  $r_{\text{д}}$  и  $r_{\text{к}}$  – радиусы тормозного диска и цельнотканого колеса подвижного состава соответ-

ственно.

Величина радиусов тормозного диска и цельнотканого колеса равны соответственно 0,31 м и 0,4785 м.

Анализируя формулу (1), можно сделать вывод, что величина тормозной силы зависит от коэффициента трения и отношения радиусов. Однако отношение радиусов является постоянной величиной, поэтому коэффициент трения оказывает решающее влияние.

Коэффициент трения композиционных накладок для дисковых тормозов определяется по формуле:

$$\varphi_{\text{к}} = 0,44 \cdot \frac{0,1 \cdot K + 20}{0,4 \cdot K + 40} \cdot \frac{v + 150}{2 \cdot v + 150},$$

где  $v$  – скорость движения, км/ч.

Был произведен расчет изменения коэффициента трения при силе нажатия равной 47 кН. В качестве расчетного случая было принято торможение с помощью дисковых тормозов, включающих по два тормозных диска и четыре накладки на ось. На одну тормозную наладку приходится усилие 11,75 кН. Торможение осуществлялось со 180 км/ч и до полной остановки. Результат расчета коэффициента трения представлен на рис. 9.

Далее был произведен расчет тормозной силы согласно формуле (1). Результат показан на рис. 10.

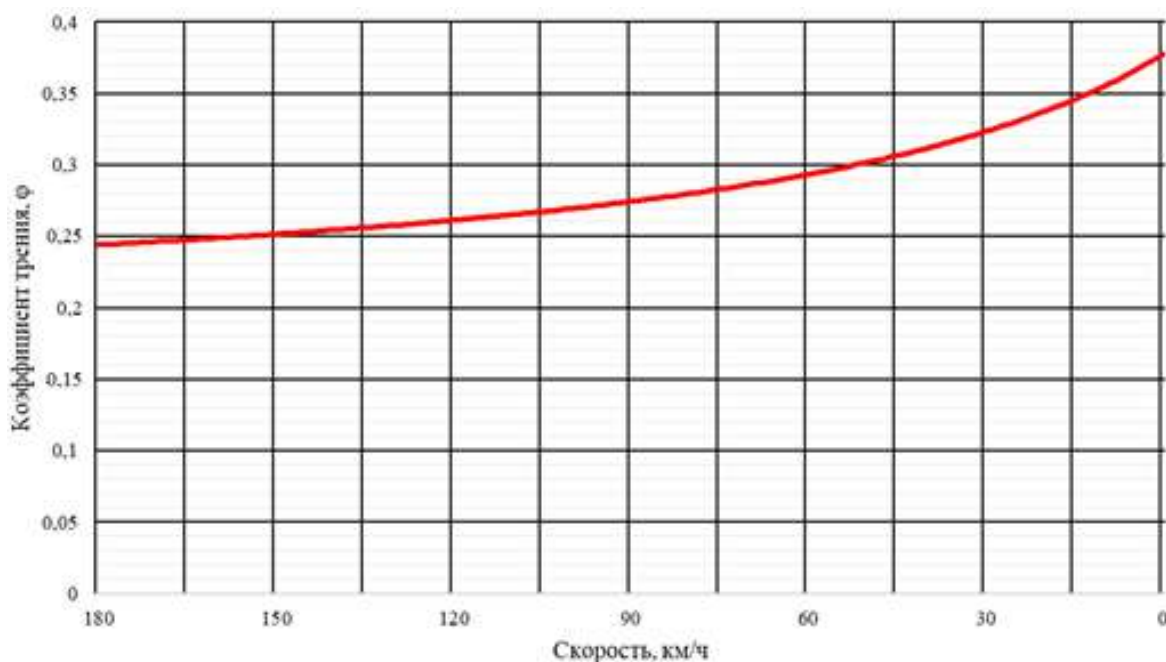
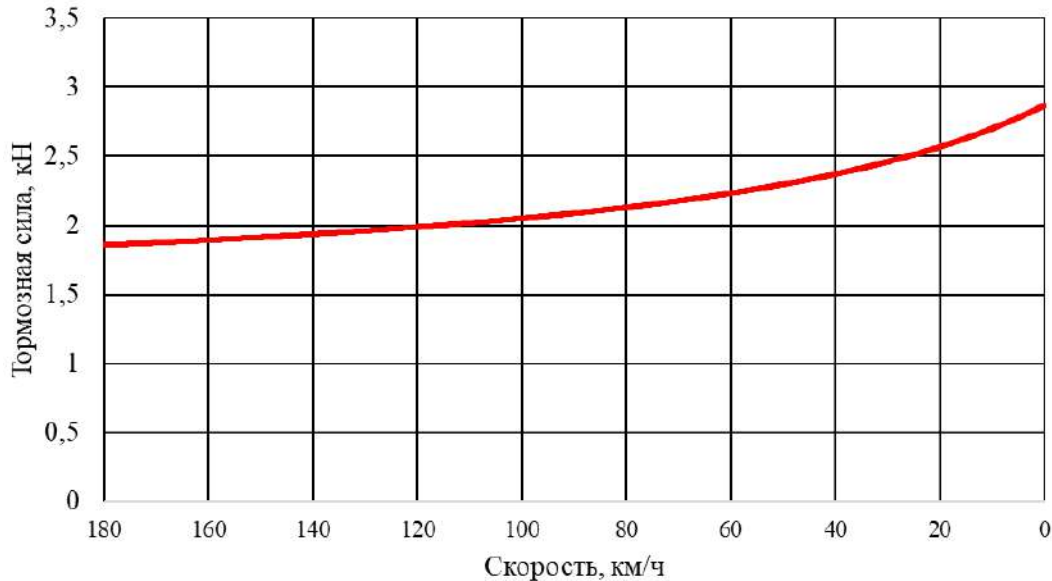


Рис. 9. Изменение коэффициента трения композиционных накладок в процессе торможения

Fig. 9. Change in the friction coefficient of composite linings during braking



**Рис. 10.** Изменение величины тормозной силы дискового тормоза в процессе торможения  
**Fig. 10.** Change in the braking force of a disc brake during braking

По теории, описанной в работах [13, 14], считается, что тепловая мощность, выделяемая в процессе торможения, пропорциональна величине механической мощности, создаваемой тормозной силой. Данную мощность возможно определить по формуле:

$$P = \frac{M \cdot n}{9,55}, \quad (2)$$

где  $M$  – величина момента, образуемого тормозной силой, кН·м;  $n$  – скорость вращения колеса, об/мин.

Анализируя формулу (2), можно сделать вывод, что при движении с высокой скоростью происходит выделение большой мощности, которая, в свою очередь, преобразуется в теплоту, затрачиваемую на нагрев тормозного диска и накладок.

Момент, образуемый тормозной силой, вычисляется по формуле:

$$M = B_{\text{тд}} \cdot r_{\text{к}}.$$

Важной задачей при моделировании тепловых процессов нагрева элементов трения тормозных систем является определение величин плотности тепловых потоков и коэффициентов тепловых потоков, так как выделяемая в процессе торможения мощность распределяется неравномерно между тормозными накладками и диском.

Величина плотности теплового потока, прикладываемой к тормозной накладке, определяется по формуле:

$$q = \frac{P \cdot (1 - \alpha_R)}{S_n},$$

где  $S_n$  – площадь поверхности трения накладки, м<sup>2</sup>;  $P$  – выделяемая мощность, Вт;  $\alpha_R$  – коэффициент теплового потока для тормозного диска.

Коэффициенты теплового потока как для диска, так и для накладок определяются по формуле:

$$\alpha_R + \alpha_K = 1,$$

где  $\alpha_K$  – коэффициент теплового потока для тормозных накладок.

Коэффициент теплового потока для тормозного диска определяется по формуле:

$$\alpha_R = \frac{1}{1 + \frac{\gamma_K \cdot \lambda_K \cdot c_K}{\gamma_R \cdot \lambda_R \cdot c_R}},$$

где  $\gamma_K, \gamma_R$  – значение плотности материалов, из которых выполнены накладки и тормозной диск соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_K, \lambda_R$  – величины коэффициентов теплопроводности материалов, из которых выполнены накладки и тормозной диск соответственно, Вт/м·°С;  $c_K, c_R$  – удельные теплоемкости материалов, из которых выполнены накладки и тормозной диск соответственно, Дж/кг·°С.

Коэффициенты  $\alpha_R$  и  $\alpha_K$  являются непостоянными, так как теплопроводность и удельная теплоемкость материалов являются зависят от температуры.

В результате расчетов были определены средние значения  $\alpha_R$  и  $\alpha_K$  при применении ком-

позиционного материала Термар-ГД. В этом случае коэффициенты теплового потока для тормозных дисков и накладок составили соответственно  $\alpha_R = 0,697$  и  $\alpha_K = 0,303$ .

Затем было рассчитано изменение величины плотности теплового потока в ходе процесса торможения. Результаты расчета приведены на рис. 11.

Следующим этапом исследования стало проведение компьютерного моделирования нагрева композиционных тормозных накладок с помощью метода конечных элементов. Моделирование проводилось в среде MSC Patran/Marc. В процессе моделирования на расчетную модель (рис. 12) были приложены нагрузки в виде теплового потока, конвекции величиной  $150 \text{ Вт/м}^2 \times ^\circ\text{C}$ , а также к поверхностям тормозной накладки было применено инфракрасное излучение с отдачей тепла в окружающую среду. Время торможения было рассчитано с помощью методов интервалов скоро-

сти, указанным в ПТР, оно составило 118 с.

Расчеты произведены в нестационарной постановке. В моделях применена сетка из конечных тетраэдрических элементов [15–18].

Результаты моделирования нагрева накладок с различной степенью износа при применении конечно-элементного анализа показаны на рис. 13.

В трех случаях нагрева накладок было выбрано три элемента: с максимальной, умеренной и минимальной температурой нагрева. По полученным значениям с этих элементов были построены зависимости изменения температуры с течением времени (рис. 14).

На рис. 15 приведен график, иллюстрирующий сравнение процесса нагрева накладок с различным износом по максимальным температурам нагрева. Указаны максимальные и минимальные температуры нагрева накладок (табл.).

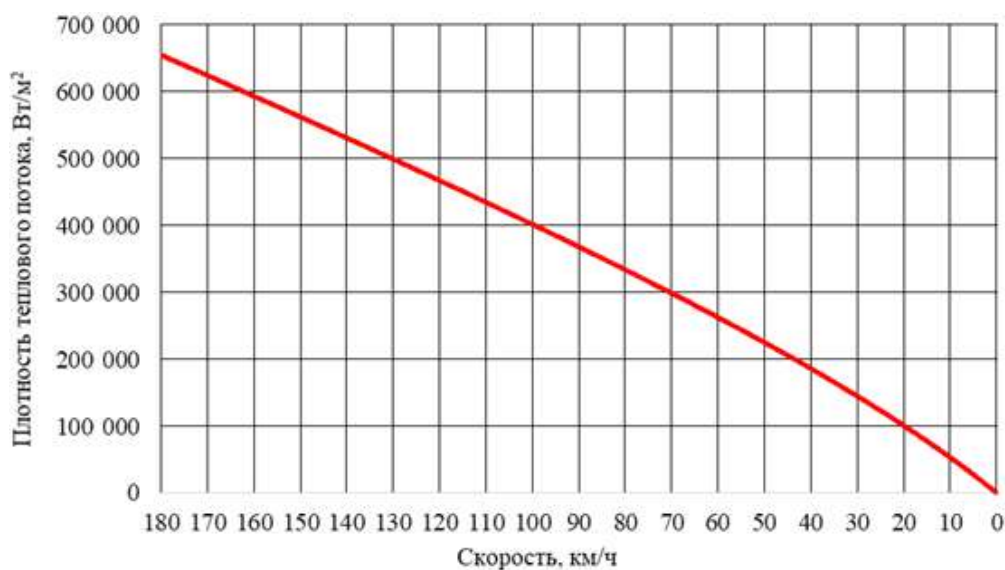


Рис. 11. Изменение величины плотности теплового потока, приходящегося на тормозную накладку

Fig. 11. Change in the heat flux density attributable to the brake lining

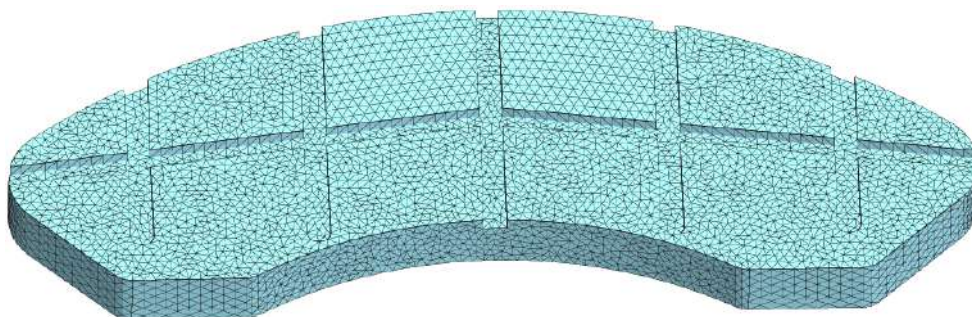
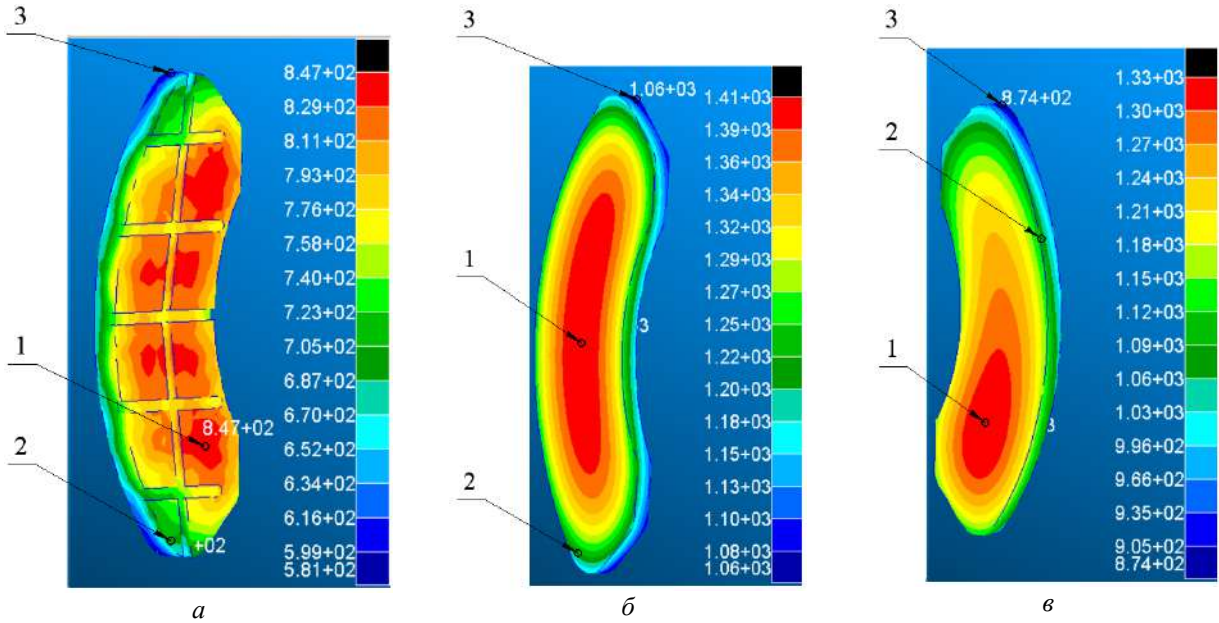


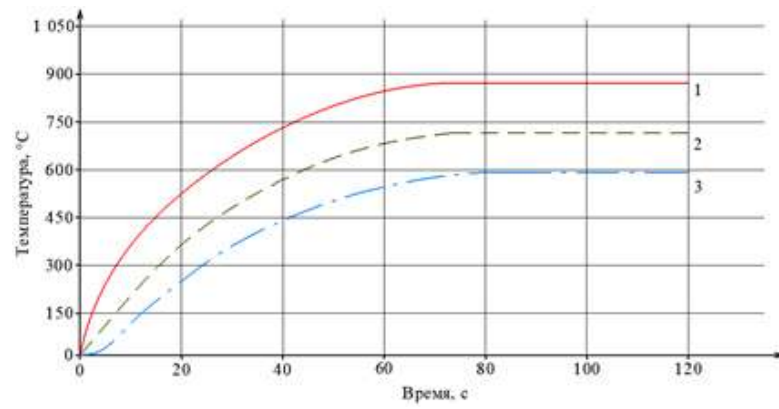
Рис. 12. Модель тормозной накладки без износа, разбитая на сетку конечных элементов (тип элемента «Тет»)

Fig. 12. Model of a brake lining without wear, broken down into a finite element mesh (element type «Tet»)

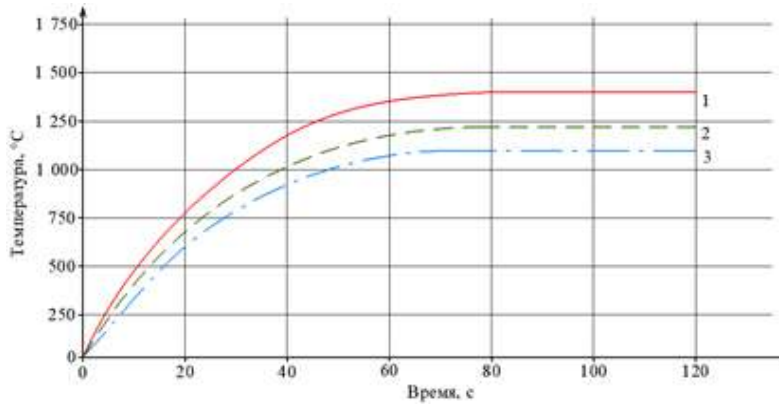


**Рис. 13.** Результат компьютерного моделирования нагрева композиционных тормозных накладок:  
*a* – без износа; *б* – с равномерным износом; *в* – с клиновидным износом  
 (1 – элементы с максимальной температурой; 2 – элементы с умеренной температурой;  
 3 – элементы с минимальной температурой)

**Fig. 13.** The result of computer simulation of heating composite brake linings:  
*a* – without wear; *b* – with uniform wear; *c* – with wedge-shaped wear  
 (1 – elements with maximum temperature; 2 – elements with moderate temperature;  
 3 – elements with minimum temperature)

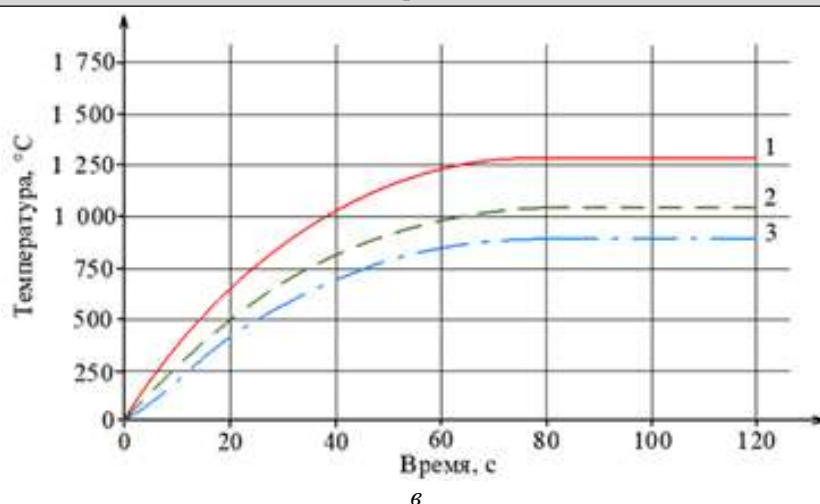


*a*



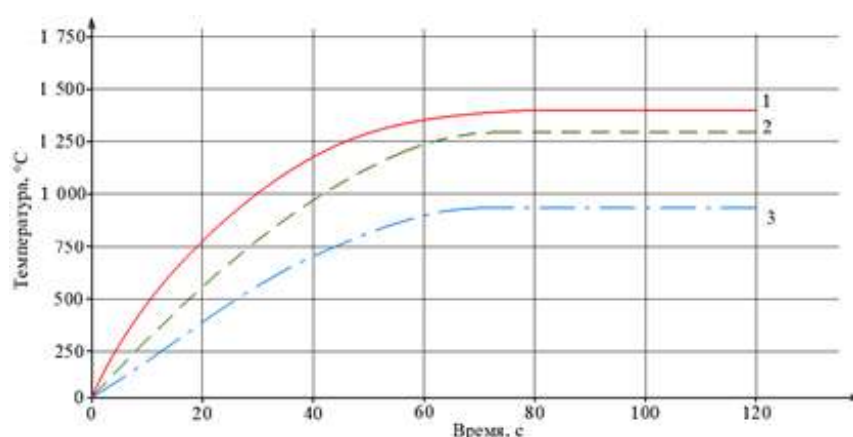
*б*





**Рис. 14.** Изменение температуры выбранных элементов неизношенной композиционной тормозной накладки (а), композиционной тормозной накладки с равномерным (б) и клиновидным износом (в):  
1 – элемент с максимальной температурой; 2 – элемент с умеренной температурой;  
3 – элемент с минимальной температурой

**Fig. 14.** Change in temperature of selected elements of an unworn composite brake lining with uniform (b) and wedge-shaped wear (c):  
1 – element with maximum temperature; 2 – element with moderate temperature;  
3 – element with minimum temperature



**Рис. 15.** Изменение температуры нагрева композиционных тормозных накладок в процессе торможения в зависимости от формы износа:  
1 – накладка с равномерным износом; 2 – накладка с клиновидным износом;  
3 – неизношенная тормозная накладка

**Fig. 15.** Change in the heating temperature of composite brake linings during braking, depending on the form of wear:  
1 – lining with uniform wear; 2 – lining with wedge-shaped wear; 3 – unworn brake pad

Максимальные и минимальные температуры нагрева тормозных накладок  
Maximum and minimum heating temperatures of brake linings

Уровень температуры Temperature level	Температура композиционной тормозной накладки, °C Composite brake lining temperature		
	Без износа Without wear	Равномерный износ Uniform wear	Клиновидный износ Wedge-shaped wear
Максимум Maximum	847	1 410	1 330
Минимум Minimum	581	1 060	874

**Заключение**

По результатам исследования установлено:

1. При заданных начальных условиях торможения подвижного состава на поверхности трения тормозных накладок максимальная температура нагрева будет достигнута через 60–70 с с момента начала торможения.

2. Форма износа и его степень, а также толщина тормозной накладки влияет на максимальную температуру нагрева.

Таким образом, аналогичные тепловые расчеты, проводимые в CAE-системах, будут

полезны при моделировании процесса торможения подвижного состава, а также при разработке дисковых тормозов для различных типов транспорта.

Результаты тепловых расчетов, проводимых в указанных системах, позволяют определить места наибольшего и наименьшего нагрева и, тем самым, учесть выявленные зоны температурной нагрузки в ходе проектирования тормозного оборудования.

**Список литературы**

1. Родченко В.А., Зандарашвили Д.С. Высокоскоростное железнодорожное движение. Мировой опыт и перспективы в России. М. : МГУПС (МИИТ), 2015. 116 с.
2. Ксенофонтова Т.Ю., Коклева Н.Е., Далингер Я.М. Роль инновационных технологий скоростного движения железнодорожного транспорта в инфраструктурном развитии регионов // Экономика устойчивого развития. 2022. № 2 (50). С. 110–114.
3. Куренков П.В., Поляева Т.И. Развитие скоростного железнодорожного движения в КНР // Вестник транспорта. 2011. № 9. С. 37–43.
4. Быкадоров С.А. Проблемы повышения скорости движения на железнодорожном транспорте // Регион: Экономика и Социология. 2005. № 1. С. 150–163.
5. Быкадоров С.А. Современные проблемы высокоскоростного движения на железнодорожном транспорте // Логистика – евразийский мост : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2018. Ч. 1. С. 36–48.
6. Мошков А.А., Сипягин Е.С. Разработка дискового тормоза для отечественного скоростного железнодорожного транспорта // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 6 (49). С. 62–65.
7. Применение методов термического анализа при исследовании влияния температуры на фрикционную основу тормозных колодок автомобиля / Л.В. Дашко, А.В. Довбня, В.Ю. Ключников и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22. № 6. С. 68–73.
8. Анисимов П.С. Тормозное оборудование высокоскоростных поездов // Железнодорожный транспорт. 2011. № 2. С. 72–77.
9. Петров А.О. Влияние тепловых процессов в колесе вагона на безопасность движения поездов // Вызовы глобализации и развитие цифрового общества в условиях новой реальности : сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. конф. Пятигорск, 2023. С. 33–37.
10. Сравнительный анализ колодочных и дисковых тормозных систем железнодорожного подвижного состава / Д.Ю. Белан, М.С. Давыдов, Н.С. Прокопенко и др. // Молодежь и системная модернизация страны : сб. науч. ст. междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых. Курск, 2016. Т. 2. С. 175–178.
11. Полозков А.В. Применение дискового тормоза на электроподвижном составе // Организация производства, экономика и менеджмент : тр. III студен. науч.-практ. конф. Воронеж, 2022. С. 89–91.
12. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.16 № 867р (ред. 02.02.2018). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
13. Исследование температуры тормозных колодок с разной степенью износа в процессе фрикционного торможения / П.Ю. Иванов, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский и др. // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (47). С. 27–34.
14. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness / P.Yu. Ivanov, A.M. Khudonogov, E.Yu. Dul'skiy et al. // International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies. Voronezh, 2019. Vol. 1614. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012086.
15. Тищенко П.А. Нестационарные температурные поля в элементах дискового тормоза скоростного вагона с учетом неустойчивости теплового контакта : дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2003. 175 с.
16. Мишин А.А. Математическое моделирование нестационарных температурных полей и напряжений в деталях дискового тормоза вагона : дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2011. 161 с.
17. Мишин А.А. Расчет температурных полей и напряжений в деталях дискового тормоза скоростного вагона // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2010. № 6. С. 38–42.
18. Моисеенко М.А., Сакало В.И. Моделирование температурных полей в деталях дискового тормоза // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2009. № 2 (22). С. 57–64.

**References**

1. Rodchenko V.A., Zandarashvili D.S. Vysokoskorostnoye zheleznodorozhnoye dvizhenie. Mirovoi opyt i perspektivy v Rossii. [High-speed rail traffic. World experience and prospects in Russia]. Moscow: MGUPS (MIIT) Publ., 2015. 116 p.

2. Ksenofontova T.Yu., Kokleva N.E., Dalinger Ya.M. Rol' innovatsionnykh tekhnologii skorostnogo dvizheniya zheleznodorozhnogo transporta v infrastrukturnom razvitiy regionov [The role of innovative technologies of high-speed rail transport in the infrastructural development of regions]. *Ekonomika ustoichivogo razvitiya* [The economics of sustainable development], 2022, no. 2 (50), pp. 110–114.
3. Kurenkov P.V., Polyayeva T.I. Razvitiye skorostnogo zheleznodorozhnogo dvizheniya v KNR [Development of high-speed rail traffic in PRC]. *Vestnik transporta* [Bulletin of Transport], 2011, no. 9, pp. 37–43.
4. Bykadorov S.A. Problemy povysheniya skorosti dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte [Problems of increasing the speed of movement in railway transport]. *Region: Ekonomika i Sotsiologiya* [Region: Economics and Sociology], 2005, no. 1, pp. 150–163.
5. Bykadorov S.A. Sovremennye problemy vysokoskorostnogo dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte [Modern problems of high-speed rail transport]. *Materialy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Logistika – evraziiskii most»* [Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference «Logistics – the Eurasian Bridge»]. Krasnoyarsk, 2018, p. 1, pp. 36–48.
6. Moshkov A.A., Sipyagin E.S. Razrabotka diskovogo tormoza dlya otechestvennogo skorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [Development of a disc brake for local high-speed rail transport]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2013, no. 6 (49), pp. 62–65.
7. Dashko L.V., Dovbnya A.V., Klyuchnikov B.Yu., Plotnikova G.V. Primeneniye metodov termicheskogo analiza pri issledovanii vliyaniya temperatury na friktsionnyuyu osnovu tormoznykh kolodok avtomobilya [Application of thermal analysis methods in the study of the effect of temperature on the friction base of car brake pads]. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and explosion safety], 2013, vol. 22, no. 6, pp. 68–73.
8. Anisimov P.S. Tormoznoye oborudovaniye vysokoskorostnykh poezdov [Braking equipment for high-speed trains]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2011, no. 2, pp. 72–77.
9. Petrov A.O. Vliyaniye teplovykh protsessov v kolese vagona na bezopasnost' dvizheniya poezdov [The influence of thermal processes in the wagon wheel on train safety]. *Sbornik materialov IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Vyzovy globalizatsii i razvitiye tsifrovogo obshchestva v usloviyakh novoi real'nosti»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «The challenges of globalization and the development of a digital society in a new reality»]. Pyatigorsk, 2023, pp. 33–37.
10. Belan D.Yu., Davydov M.S., Prokopenko N.S., Geletyuk Yu.N., Khaseinova S.B., Petrov I.Yu. Sravnitel'nyi analiz kolodochnykh i diskovykh tormoznykh sistem zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Comparative analysis of pad and disc brake systems of railway rolling stock]. *Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh «Molodezh' i sistemnaya modernizatsiya strany»* [Proceedings of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists «Youth and systemic modernization of the country»]. Kursk, 2016, vol. 2, pp. 175–178.
11. Polozkov A.V. Primeneniye diskovogo tormoza na elektropodvizhnom sostave [The use of a disc brake on an electric rolling stock]. *Trudy III Studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Organizatsiya proizvodstva, ekonomika i menedzhment»* [Proceedings of the III Student Scientific and practical conference «Organization of production, economics and management»]. Voronezh, 2022, pp. 89–91.
12. Rasporyazheniye OAO «RZHD» ot 12.05.16 № 867r «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» (red. 02.02.2018) [Order of JSC «Russian Railways» dated May 12, 16 No 867r «On approval of the rules of traction calculations for train work» (ed. February 2, 2018)].
13. Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Korsun A.A., Treskin S.V. Issledovaniye temperatury tormoznykh kolodok s raznoi stepen'yu iznosa v protsesse friktsionnogo tormozheniya [Investigation of the temperature of brake pads with different degrees of wear during friction braking]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2020, no. 3(47), pp. 27–34.
14. Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Manuilov N.I., Khamnaeva A.A., Korsun A.A., Treskin S.V. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness. *International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies*. Voronezh, 2019, vol. 1614. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012086.
15. Tishchenko P.A. Nestatsionarnyye temperaturnyye polya v elementakh diskovogo tormoza skorostnogo vagona s uchetyom nestabil'nosti teplovogo kontakta [Non-stationary temperature fields in the disc brake elements of a high-speed wagon, taking into account the instability of thermal contact]. Ph.D.'s thesis. Bryansk, 2003. 175 p.
16. Mishin A.A. Matematicheskoye modelirovaniye nestatsionarnyykh temperaturnyykh polei i napryazhenii v detalyakh diskovogo tormoza vagona [Mathematical modeling of non-stationary temperature fields and stresses in the details of the disc brake of the wagon]. Ph.D.'s thesis. Bryansk, 2011. 161 p.
17. Mishin A.A. Raschet temperaturnyykh polei i napryazhenii v detalyakh diskovogo tormoza skorostnogo vagona [Calculation of temperature fields and stresses in high-speed wagon disc brake parts]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport], 2010, no. 6, pp. 38–42.
18. Moiseenko M.A., Sakalo V.I. Modelirovaniye temperaturnyykh polei v detalyakh diskovogo tormoza [Simulation of temperature fields in disc brake parts]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2009, no. 2 (22), pp. 57–64.

**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.

**Емельянов Денис Олегович**, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: emelyanovdenis1995@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.

**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.

**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.

**Denis O. Emel'yanov**, Ph.D. Student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: emelyanovdenis1995@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.

**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.

## Ключевые аспекты функционирования динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «Российские железные дороги»

Н.В. Власова, В.А. Оленцевич✉

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

✉olencevich\_va@mail.ru

### Резюме

В научной статье авторы поднимают вопросы взаимосвязанности производственных и транспортно-логистических процессов в рамках принимаемых мер по внедрению динамической модели загрузки инфраструктурного комплекса грузоотправителей, структурных подразделений ОАО «Российские железные дороги» и пользователей транспортных услуг. Проведен факторный анализ действующей до 2023 г. процедуры обработки заявок на перевозку груза формы ГУ-12 и новой автоматизированной процедуры с учетом внедрения комплекса «Динамическая модель загрузки инфраструктуры», что помогло определить сильные и слабые стороны технологии согласования заявок. Изучены основные аспекты работы динамической модели загрузки инфраструктуры, которые предусматривают достаточно обширную совокупность функциональных возможностей, направленных на повышение клиентоориентированности отрасли. Внедрение автоматизированной процедуры позволит добиться стабильности перевозочного процесса, улучшить качественные характеристики эксплуатационной работы, максимально быстро и эффективно проводить организацию технологических операций и их планирование, обеспечить полноценный логический контроль согласования заявок формы ГУ-12 за счет сбалансированности взаимодействия инфраструктурного комплекса грузоотправителей и перевозчика и достигнуть тем самым бесперебойности в осуществлении транспортировки в секторе грузовых перевозок, а также повысить рентабельность работы отрасли. Цель проводимого анализа заключалась в выявлении уровня взаимосвязанности существующих технологических процессов, в которых участвуют пользователи транспортных услуг ОАО «РЖД», и транспортно-логистических процессов в условиях поэтапного внедрения динамической модели загрузки инфраструктуры, в разработке комплекса рекомендаций по адаптации и устранению проблем в работе модели.

### Ключевые слова

инфраструктурный комплекс железнодорожного транспорта, грузоотправитель, перевозчик, динамическая модель загрузки инфраструктуры, обеспечение логического контроля, размер пропускной и перерабатывающей способностей, автоматизированная система, суточный клиентский план погрузки, процедура технологии обработки заявок, грузовая база

### Для цитирования

Власова Н.В. Ключевые аспекты функционирования динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «Российские железные дороги» / Н.В. Власова, В.А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 148–157. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).148-157.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 20.11.2023 г.; поступила после рецензирования: 08.12.2023 г.; принята к публикации: 11.12.2023 г.

## Key aspects of the functioning of the dynamic model of loading the JSC «Russian Railways» infrastructure

N.V. Vlasova, V.A. Olentsevich✉

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

✉olencevich\_va@mail.ru

### Abstract

In the scientific article, the authors raise the issues of the interconnectedness of production and transport and logistics processes within the framework of the measures taken to introduce a dynamic loading model of the infrastructure complex of shippers, structural divisions of JSC «Russian Railways» and users of transport services. A factor analysis of the procedure for processing applications for cargo transportation of the GU–12 form and a new automated procedure was carried out, taking into account the introduction of the «Dynamic Model of Infrastructure Loading» complex, which made it possible to determine the strengths and weaknesses of the application approval technology. The main aspects of the «Dynamic Model of Infrastructure Loading» are considered and analyzed, which provide for a fairly extensive set of functionality aimed at increasing the customer orientation of the industry. The introduction of an automated procedure makes it possible to achieve the stability of the organization of the transportation process, improve the quality characteristics of operational work, organize technological processes and their planning as quickly and efficiently as possible, and provide full-fledged logical control of the approval of applications of the GU-12 form. The solution of these issues will ensure optimal coordination of applications due to the balance of the work of the infra-

structure complex of shippers and the carrier, thereby achieving stability in the organization of the transportation process of the cargo transportation sector, and organizing more cost-effective work of the industry. The analysis carried out by the authors aimed to determine the level of interconnectedness of the existing technological processes of users of transport services of JSC «Russian Railways» and transport and logistics processes in the context of the phased introduction of a dynamic model of infrastructure loading, on the basis of which to develop and propose a set of recommendations for adaptation and elimination of problems in the model, which is reflected in this scientific article.

### Keywords

infrastructure complex of railway transport, shipper, carrier, dynamic model of infrastructure loading, provision of logical control, size of throughput and processing capacity, automated system, daily customer loading plan, application processing technology procedure, cargo base

### For citation

Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Klyuchevye aspekty funktsionirovaniya dinamicheskoi modeli zagruzki infrastruktury OAO «Rossiiskie zheleznye dorogi» [Key aspects of the functioning of the dynamic model of loading the infrastructure of JSC «Russian Railways»]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 148–157. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).148-157.

### Article info

Received: November 20, 2023; Revised: December 8, 2023; Accepted: December 11, 2023.

### Введение

Проблемы своевременного вывоза продукции российскими промышленными, сельскохозяйственными и сырьевыми предприятиями, а также компаниями существовали в разные годы, существуют и сегодня. Очередная проблема данного времени вызвана тем фактором, что ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») с марта текущего года поэтапно внедряет автоматизированную систему по согласованию заявок грузоотправителей на перевозку груза (форма ГУ-12) – «Динамическая модель загрузки инфраструктуры» (ДМЗИ). Главная задача программного комплекса заключается в производстве полноценного логического контроля по ограничению приема заявок на перевозку грузов свыше установленных объемов нормативной документацией и уровня возможностей инфраструктурного комплекса железных дорог [1–3].

ДМЗИ позволяет в автоматизированном режиме осуществлять контроль согласования заявок грузоотправителей на процедуру перевозки, а также обеспечивать установленный уровень суточного плана погрузки, не позволяя превышать актуальные возможности инфраструктуры ОАО «РЖД» и грузоотправителя, исключать непроизводительные простои подвижного состава [4].

Если учесть технологические особенности производственных процессов по выпуску готовой продукции российскими промышленными предприятиями, а также нормы и нормативы времени на выполнение грузовых операций,

данная процедура согласования ДМЗИ может привести к возникновению различного рода рисков для функционирования инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД» [5]. Действующий инфраструктурный комплекс путей необщего пользования российской промышленности при условии полного введения в эксплуатацию ДМЗИ не сможет принимать к перевозке потребные объемы грузов, которые производит промышленность, и даже при падении размеров производства, так как при введении новой формы логического контроля существует зависимость объемов погрузки от размеров инфраструктурного комплекса грузоотправителей, что приведет к сокращению производственного потенциала примерно на 30 %. Промышленные предприятия в своих объемах производства оказываются зависимы от существующего размера пропускной и перерабатывающей способностей инфраструктурного комплекса. Если до момента ввода ДМЗИ транспортная отрасль выступала как драйвер развития промышленности страны, то при введении данной технологии превращается в ее тормоз [5, 6].

Также ДМЗИ не содержит в своем базовом потенциале следующие данные:

- истории отказов;
- информацию о сроках задержки отправок по сравнению с первоначальным согласованным в плане погрузки объемом перевозки;
- сведения о сроках включения вагонов в поездопоток согласно плану формирования.

На основе ранее согласованной заявки вагон может пройти процедуру подачи на фронты

погрузки путей общего или необщего пользования, при этом перевозчик на данный момент времени не будет иметь информации, когда вагон будет согласован к отправлению [7, 8].

Целью данной статьи является анализ уровня взаимосвязанности существующих технологических процессов, в которых участвуют пользователи транспортных услуг ОАО «РЖД», и транспортно-логистических процессов в условиях поэтапного внедрения динамической модели загрузки инфраструктуры, на основе чего разработаны рекомендации по адаптации и устранению проблемных мест в работе модели.

### **Процедура технологии обработки заявок с учетом внедрения динамической модели загрузки инфраструктуры**

До введения ДМЗИ грузоотправитель согласовывал с перевозчиком заявку формы ГУ-12, при этом у него существовала гарантия на отправку груза в заявленном объеме согласно плану перевозок. Что являлось основой для составления суточного клиентского плана погрузки.

Начиная с 2023 г. к данной процедуре добавилась еще одна – программный комплекс, который при уже погруженном вагоне без пояснения причины отказа в перевозке имеет возможность отклонить процесс отправки вагона, если на пути следования имеются ограничения. Данная технология согласования заявок позволяет гарантировать грузоотправителю выполнение условий заявки точно в срок и в плановом объеме только при условии свободы инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД», тем самым появляется возможность исключения непроводительных простоев подвижного состава на объектах железнодорожного транспорта.

Внедрение ДМЗИ, по мнению ее создателей, позволяет добиться стабильности организации перевозочного процесса, улучшить качественные характеристики эксплуатационной работы, планировать технологические процессы более оперативно и эффективно, обеспечивать полноценный логический контроль согласования заявок формы ГУ-12. Это в свою очередь создаст возможность для эффективного согласования заявок за счет сбалансированности работы инфраструктурного комплекса грузоотправителей и перевозчика, тем самым бу-

дет достигнута стабильность организации перевозочного процесса сектора грузовых перевозок, что позволит повысить рентабельность работы отрасли.

Для реализации указанных задач в ДМЗИ предусмотрен ряд функциональных возможностей:

- моделирование маршрутов продвижения грузовых отправок с установлением четкого времени доставки с учетом данных плана формирования;

- автоматизированная оценка занятости инфраструктурного комплекса с целью выявления возможности беспрепятственного пропуска подвижного состава в соответствии с согласованными заявками на перевозку грузов, а также порожнего вагонопотока;

- определение вариантов графиков подач подвижного состава при условии отсутствия возможности принять груз к перевозке на основе заявляемых грузоотправителем по ГУ-12;

- при наличии в данный момент объектов инфраструктурного комплекса с ограничением уровня пропускных и провозных способностей с учетом установленных сроков доставки грузов произвести поиск оптимальных вариантов подач, разработать альтернативные маршруты продвижения как груженых, так и порожних вагонов;

- учет условий «Временных правил и применяемых на время приостановки действия Правил недискриминационного доступа перевозчиков к инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 25 ноября 2003 г. № 710 в процессе рассмотрения одиночных и групповых заявок;

- дополнительные меры контроля заявок назначением на иностранную дорогу, согласно положению «Нормы передачи экспортных и транзитных грузов с железных дорог России и стран Содружества Независимых Государств и Балтии в третьи страны, разработанным в соответствии с Порядком планирования перевозок грузов железными дорогами государств – участников Содружества Независимых Государств, Грузии, Латвийской Республики, Литовской Республики, Эстонской Республики, утвержденным решением Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества»;

– факторный анализ показателей суточного клиентского плана погрузки в соответствии с положениями «Регламента взаимодействия Территориального центра фирменного транспортного обслуживания и Дирекции управления движением на полигоне железной дороги по реализации процессов коммерческой диспетчеризации»;

– контроль правильности оформления поступающих от пользователей данных, наличие возможности редактирования путем настройки фильтров по всем полям ГУ-12.

ДМЗИ функционирует автоматически и не требует ручного вмешательства. Поскольку работа ДМЗИ носит непрерывный характер, существует возможность мгновенно реагировать на запросы ГУ-12, что, в свою очередь, позволяет принимать технически верные управленческие решения и в интересах грузоотправителя, и в интересах перевозчика. Так, в случае, если система выдает факт невозможности согласования заявки, графики отгрузки в автоматическом режиме оптимизируются. Однако, если существует информация о максимальном уровне загрузки инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД» по маршруту следования груза, то система выдает отказ с расшифровкой его причины.

Загрузка инфраструктуры автоматически представляется на интерактивной карте-схеме сети железных дорог диаграммами с возможностью просмотра необходимой информации в сочетании различных информационных признаков на любые из плановых 45 сут в режиме «выпадающих окон». Реализуется возможность съема необходимой информации о состоянии функционирования железнодорожных станций, узлов и участков железнодорожных линий с целью возможности обеспечения автоматического отображения данных о грузопотоках, вагоно- и поездопотоках. Дальнейшее совершенствование функционального состояния динамической модели по визуализации хранящейся и перерабатываемой информации предоставит

возможность на качественно ином уровне принимать управленческие решения, что, несомненно, повысит точность планирования [9].

### Структурная схема динамической модели загрузки инфраструктуры

Данная динамическая модель представляет собой программный комплекс, который позволяет обеспечить непрерывную процедуру по рассмотрению и согласованию ГУ-12, которые поступают из Автоматизированной системы электронной транспортной накладной (АС ЭТРАН), а также имеет возможность передавать результаты их рассмотрения и согласования в АС ЭТРАН с учетом возможностей инфраструктурного комплекса.

Основными ограничениями элементов структуры модели ДМЗИ, характеризующими объекты инфраструктурного комплекса, являются:

– сортировочные станции, пункты формирования грузопотоков, включая сортировочные устройства;

– железнодорожные пути общего и необщего пользования грузоотправителей, на которых расположены фронты погрузки грузов;

– железнодорожные станции отправления / прибытия грузов и порожнего подвижного состава;

– участки железных дорог ОАО «РЖД»;

– железнодорожные станции назначения грузопотоков и порожних вагонов;

– железнодорожные пути необщего пользования назначения грузов;

– план формирования грузовых поездов.

Прогнозируемые уровни загрузки рассматриваемых объектов и участков железнодорожных линий определяются для всех без исключения отправок:

– по инфраструктурному комплексу ОАО «РЖД»;

– с оформленными перевозочными документами, но еще не отправленные;

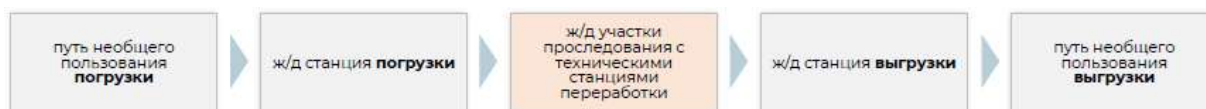


Рис. 1. Цепочки элементов проверки возможностей инфраструктурного комплекса для пропуска заявленных объемов погрузки

Fig. 1. Chains of elements for checking the capabilities of the infrastructure complex for throughput of the declared loading volumes



– согласованные к перевозке на более раннем сроке.

Оценка существующих возможностей инфраструктурного комплекса с целью пропуска заявленных объемов грузоперевозки по форме ГУ-12, а также запрос – уведомление ДМЗИ с учетом уровня пропускной и перерабатывающей возможностей осуществляются согласно алгоритму, представленному на рис. 1. Необходимая информация для работы ДМЗИ поступает из смежных автоматизированных систем.

### Некоторые итоги работы в условиях подключения логического контроля и применения динамической модели загрузки инфраструктуры

Начатое с 2023 г. поэтапное подключение логического контроля на запрет согласования заявок ГУ-12 и строк плана суточной клиентской погрузки в случаях повышения инфраструктурных возможностей сети железных дорог дало первые результаты. Статистика работы системы ДМЗИ в марте 2023 г. представлена на рис. 2–5 [10].



Рис. 2. Результаты согласования суточного клиентского плана погрузки с использованием динамической модели загрузки инфраструктуры

Fig. 2. The results of the coordination of the daily client loading plan using a dynamic model of infrastructure loading



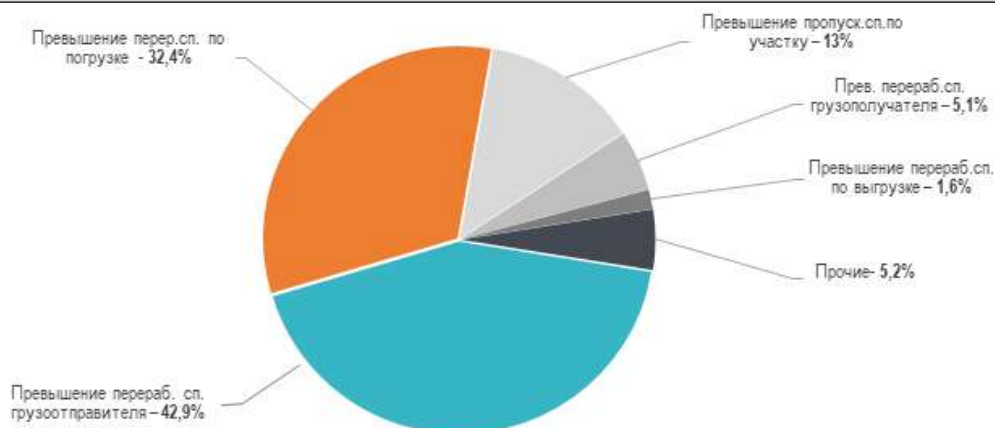
Рис. 3. Итоги согласования заявок ГУ-12 с использованием динамической модели загрузки инфраструктуры

Fig. 3. Results of approval of GU-12 applications using a dynamic infrastructure loading model



Рис. 4. Выборочная проверка соблюдения графика подач клиентами

Fig. 4. Random check of clients' submission schedule



**Рис. 5.** Причины отклонения согласования ГУ-12 в динамической модели загрузки инфраструктуры  
**Fig. 5.** Reasons for rejection of GU-12 approval in the dynamic infrastructure loading model

По данным рис. 2–5 мы видим, что динамика грузоперевозок с начала 2023 г. выглядит многообещающей. ДМЗИ при формировании ответа на запрос ведет учет информации о текущих операциях с подвижным составом, по всей сети железных дорог России ведет контроль продвижения согласованных заявок.

В марте 2023 г. холдинг обеспечил стабильную погрузку почти 4 млн т грузов в сутки, это максимальное значение показателя с 2021 г. В целом погрузка составила 81 млн т, что на 2,1 % выше аналогичного показателя 2022 г., при этом наблюдается прирост экспортных грузов на 29,5 млн т. С начала марта 2023 г. прирост экспорта нефти и нефтепродуктов составил 10,6 %, железных и марганцевых руд – 10,1 %, минеральных удобрений – 6 %, зерновых грузов – более 90 %. За первый квартал текущего года тарифный грузооборот превысил значения прошлого года почти на 5 % и составил 7,5 млрд т-км в сутки – это исторический максимум в работе холдинга. В рамках функционирования Восточного полигона железных дорог максимум по тарифному грузообороту также достигнут – плюс 6 % к 2022 г., 8 % к 2019 г.

С момента начала функционирования ДМЗИ, по итогам марта 2023 г. грузовладельцы столкнулись с резким сокращением количества заявок на перевозку своих грузов по различным категориям. Система в автоматическом режиме отказывала в согласовании горнообогатительным комбинатам на перевозку сырья на металлургические заводы, металлургическим заводам на перевозку в адрес постоянных покупателей, предприятиям химической

промышленности в отправке вагонов с опасными грузами, предприятиям непрерывного производства в поставках сырья и отгрузках готовой продукции.

Недискриминационный доступ к инфраструктуре в настоящее время определяется решением правления ОАО «РЖД» с выделением грузов и направлений, перевозки по которым находятся под контролем руководства страны. Таким образом, грузы, которые имеют более высокий приоритет, уступают место грузам с меньшим приоритетом, но стоящие на контроле руководства страны.

К высокоприоритетным грузам относятся каменный уголь на экспорт (первый тарифный класс), лесные грузы на экспорт (первый тарифный класс) и ряд грузов, следующих из северных районов РФ на восток и в обратном направлении, а также контейнерные перевозки.

Прокат черных металлов, грузы третьего тарифного класса вынуждены пропускать свою очередь на отправку и срывать контракты на поставку готовой продукции. Происходит скопление опасных грузов в городских агломерациях, получатели важных наименований продукции не выполняют свои обязательства перед клиентами [8, 11].

В анализируемом периоде на Восточном полигоне железных дорог увеличены объемы грузоперевозки на 7,3 %, размер экспортных грузопотоков в адреса морских портов и пограничных станций Дальнего Востока превысил 10 млн т, что выше на 12 % по сравнению с прошлым периодом. Данная тенденция оптимизации отраслевых показателей наблюдается при увеличении суммарной величины грузовых от-

правок в условиях отсутствия нарушений нормативного периода их доставки. Такая техника носит название «надежность доставки» и в целом по холдингу составляет почти 99 % (рост к прошлому году 3,4 %) [8, 10, 12].

Из рис. 4 и 5 видно, что наблюдается достаточно большое количество претензий грузоотправителей к работе ДМЗИ, которая, по их мнению, препятствует своевременной отправке грузов. При этом статистика ОАО «РЖД» свидетельствуют об обратном. По основным лимитирующим объектам инфраструктурного комплекса железных дорог наблюдается устойчивая положительная динамика. Объемы погрузки в адреса морских портов по Октябрьской железной дороге с марта 2023 г. имеют прирост более чем на 20 %, по морским портам Северо-Кавказской железной дороги – плюс 13,5 %, Дальневосточной железной дороги – плюс 6,7 %. По мнению руководства холдинга, ситуация была стабилизирована путем увеличения степени равномерности объемов погрузки в направлении морских портов, созданием условий по бесперебойному продвижению грузопотоков на восточном направлении, что как раз и стало возможным благодаря интеграции автоматизированных систем ОАО «РЖД» системы морских портов через создание единого информационного пространства для грузоотправителя, перевозчика и грузополучателя на всем отрезке оказания услуги перевозки – комплекс управления подводом поездов, следующих в адрес припортовых станций во взаимовязке с дорожной информационно-логистической системой [13–15].

Отчетность ОАО «РЖД» при работе в новых условиях согласования показывает, что количество отклоненных заявок формы ГУ-12 не превышает 5 %, т.е. существует потенциал для корректировки, а значит отсутствует влияние на процессы погрузки, размер которых должен прирастать, особенно на восточном направлении. При этом статистические данные грузоотправителей показывают обратное – заявленные планы совпадают с фактической погрузкой в среднем на 36 % [10, 12].

### **Вопросы адаптированности и устранения проблем**

В настоящее время, бесспорно, необходима отладка и устранение имеющихся проблем в части адаптации ДМЗИ к ежедневно ме-

няющейся ситуации на сети железных дорог.

Все грузоотправители понимают условия приоритизации, текущих ограничений и дефицита инфраструктуры, но настаивают на реализации возможности доступа к инфраструктуре общего пользования всех грузовладельцев. Необходимо полностью исключить случаи, когда заявку на перевозку грузов согласуют не грузовладельцу, а посреднику (которым может выступать и оператор подвижного состава).

Грузовая база в РФ имеется и готова к поставкам на рынки потребления, основная задача ОАО «РЖД» в текущих условиях – выполнить свои обязательства как перевозчика и исключить свое влияние на регулирование рынков сбыта по причине имеющегося дефицита инфраструктурного комплекса. Задача поиска альтернативных путей решения не должна подразумевать создание дополнительных проблем сторонним компаниям.

Так, очевидно, что процесс функционирования ДМЗИ предусматривает предоставление морскими терминалами информации о наличии груза на их терминально-складских комплексах с указанием категории и идентификатора внешнеторговых договоров, расписания работы флота и востребованности груза с целью подготовки судовых партий. При этом ОАО «РЖД» обязана предоставить план-график подвода, местонахождение и прогнозные значения по подходам грузов к морским терминалам [16–18].

Существует вероятность, что дальнейшее применение не адаптированного варианта ДМЗИ на сети железных дорог приведет к оттоку клиентов ОАО «РЖД». Причиной данного фактора становится первоочередное согласование заявок ГУ-12 и клиентского плана приоритетным категориям грузоотправителей, что заложено условиями недискриминационного доступа, но при этом не имеющим на установленный срок готовой к отправлению грузовой базы. Подобная техническая политика не дает возможности грузоотправителям с более низким статусом и имеющим готовый к транспортировке груз получить согласование заявки, т.е. объемы уже распределены в рамках пропускной способности инфраструктуры среди грузоотправителей груза с высоким приоритетом, но без необходимого объема груза, готового к отправлению. На основании информации от перевозчика ко-

личество подаваемых заявок превышает возможности перевозок как минимум в 3 раза.

Наличие высокого уровня взаимосвязанности производственных и транспортно-логистических схем при функционировании динамической модели будет способствовать нарушению логистических схем поставок продукции партнерам на территории РФ и СНГ. Для грузоотправителей перечисленные причины неизбежно будут способствовать сокращению объемов производства, добычи, и, как следствие, отгрузки, ограничению краткосрочных заказов. Сокращение производства приведет к многочисленным убыткам, потере имиджа компаний и производств, следовательно, сокращению персонала.

Для решения вопросов адаптированности ДМЗИ и устранения существующих проблем, по мнению авторов, необходимо:

- при проведении процедуры планирования объемов погрузки увеличить глубину планирования на период до трех суток;

- для создания эффективной системы утверждения прогнозных значений заявленных размеров погрузки реализовать возможность загрузки в суточном клиентском плане погрузки, кроме заявленных объемов, еще и сведения об отгруженных вагонах, которые уже имеют стопроцентную готовность к отправке под дан-

ные заявки, с возможностью пересмотра приоритета в пользу заявок, подтвержденных реально загруженными вагонами [10, 19–21].

### Заключение

Исходя из анализа функционирования динамической модели, грузоотправители должны иметь право на льготы по каждому из направлений следования грузопотоков, иметь возможность корректировать программы производства продукции (добычи ресурсов) в соответствии с установленными квотами.

Существует необходимость поиска всех возможных резервов внутриперевозочного железнодорожного процесса, предусматривающих:

- понижение доли порожнего пробега вагонов;

- объединение вагонных парков операторов в единый пул с дальнейшей передачей их в собственность ОАО «РЖД»;

- подача порожних вагонов «под ближайшую погрузку» и пр.

ОАО «РЖД» должна обеспечить точность, надежность и ритмичность доставки грузов. Сегодня автоматизированная система ДМЗИ проходит тестовый режим, необходимо продолжать ее доработку на основе замечаний непосредственных пользователей.

### Список литературы

1. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р // Министерство транспорта Российской Федерации : офиц. интернет-ресурс. URL: <http://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (Дата обращения 16.11.2023).
2. Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р (ред. 24.06.2023). URL: <http://government.ru/docs/34297/> (Дата обращения 16.11.2023). Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс в локал. сети.
3. Модель динамит грузы // Коммерсантъ : сайт. URL : <https://www.kommersant.ru/doc/5889545> (Дата обращения 16.11.2023).
4. Динамическая модель загрузки инфраструктуры приведет к снижению объемов производства и отгрузки, убыткам и потере имиджа металлургических предприятий // РЖД Партнер.ру : сайт. URL : <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/dinamicheskaya-model-zagruzki-infrastruktury-privedet-k-snizheniyu-obemov-proizvodstva-i-otgruzki-ub/> (Дата обращения 16.11.2023).
5. Власова Н.В., Оленевич 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.
6. Булохова Т.А., Перетолчина А.С. Уровень развития железнодорожной инфраструктуры как фактор обеспечения клиентоориентированности отрасли и устойчивого развития регионов // Развитие экономической науки на транспорте: экономическая основа будущего транспортных систем : сб. науч. ст. VII Междунар. науч.-практ. конф. СПб, 2019. С. 147–154.
7. Об утверждении Технологии работы Динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «РЖД» при реализации процесса согласования заявок на перевозку грузов и запросов-уведомлений на перевозку порожних грузовых вагонов : распоряжение ОАО «РЖД» от 25.11.2022 N 3090/р (ред. 11.07.2023). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ локал. сети.
8. К динамической модели загрузки инфраструктуры подключились все дороги // Гудок. 2023. 23 март. : сайт. URL : <https://www.gudok.ru/content/freighttrans/1630422/> (Дата обращения 16.11.2023).
9. ДМ ЗИ позволяет мгновенно реагировать на запросы ГУ-12 // Intellex : сайт. URL : <https://intellex.ru/press-center/news-archive/pub-8833947.html> (Дата обращения 16.11.2023).
10. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 16.11.2023).

11. Методика расчета показателей работы вагонных парков, позволяющих осуществлять мониторинг, анализ и оценку влияния избыточности парков на эффективность и результативность работы сети : утв. старшим вице-президентом ОАО «РЖД» от 31.10.2013 № 361 (ред. 12.11.2015). Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ локал. сети.

12. Об утверждении классификатора мест проведения грузовых и коммерческих операций на путях общего и необщего пользования : распоряжение ОАО «РЖД» от 26.08.2021 № 1866/р. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ локал. сети.

13. Старожилова А.В., Смоловская Е.А., Власова Н.В. Внедрение цифровых платформ документооборота для автоматизации процессов грузоперевозок железнодорожным транспортом // Автомобилестроение : проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. Ижевск, 2023. С. 569–573.

14. Бачурин В.Д., Буторина Д.А., Файзрахманова Е.В. Искусственный интеллект и прогнозная аналитика на железнодорожном транспорте // Технологии и техника: пути инновационного развития : сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2023. С. 94–98.

15. 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.

16. Об утверждении концепции клиентоориентированности холдинга «РЖД» в области грузовых перевозок : распоряжение ОАО «РЖД» от 07.12.2016 г. № 2487р. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ локал. сети.

17. 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.

18. Automated calculation method effect values in load securing elements fixed on a rolling stock / N.V. Vlasova, V.A. Olentsevich, V.Yu. Konyukhov et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 1064. 012042. DOI 10.1088/1757-899X/1064/1/012042.

19. Буракова А.В., Иванкова Л.Н., Козлов Н.С. Исследование задержек подвижного состава на станциях и подходах к ним // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : тр. науч.-практ. конф. Воронеж, 2022. С. 14–18.

20. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Волкова С.Г. Формирование опорной сети транспортно-логистических комплексов // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сб. тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием. М., 2022. С. 177–183.

21. Гантимурова Ю.О. Объектно-ориентированный подход к моделированию транспортной системы // Сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та. 2023. № 20. С. 109–116.

## References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (Accessed November 16, 2023).

2. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 30.09.2018 g. № 2101-r «Ob utverzhdenii Kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistral'noi infrastruktury na period do 2024 goda» (red. 24.06.2023) [Decree of the Government of the Russian Federation no 2101-r dated September 30, 2018 «On approval of the Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024» (ed. June 24, 2023)].

3. Model' dinamit gruzy (elektronnyi resurs) [The model refuses to transport goods (electronic resource)]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/5889545> (accessed November 16, 2023).

4. Dinamicheskaya model' zagruzki infrastruktury privedet k snizheniyu ob'emov proizvodstva i otgruzki, ubytkam i potere imidzha metallurgicheskikh predpriyatii (Elektronnyi resurs) [The dynamic model of infrastructure loading will lead to a decrease in production and shipment volumes, losses and loss of the image of metallurgical enterprises (electronic resource)] (Accessed November 16, 2023).

5. 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.

6. Bulokhova T.A., Peretolchina A.S. Uroven' razvitiya zheleznodorozhnoi infrastruktury kak faktor obespecheniya klientoorientirovannosti otrasli i ustoychivogo razvitiya regionov [The level of development of railway infrastructure as a factor in ensuring the customer orientation of the industry and sustainable development of regions]. *Sbornik nauchnykh statei VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitie ekonomicheskoi nauki na transporte: ekonomicheskaya osnova budushchego transportnykh sistem»* [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference «Development of economic science in transport: the economic basis of the future of transport systems»]. Saint Petersburg, 2019, pp. 147–154.

7. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 25.11.2022 no 3090/r «Ob utverzhdenii Tekhnologii raboty Dinamicheskoi modeli zagruzki infrastruktury OAO «RZHD» pri realizatsii protsessa soglasovaniya zayavok na perevozku грузов i zaprosovedomlenii na perevozku porozhnykh gruzovykh vagonov» (red. 11.07.2023) [Order of JSC «Russian Railways» dated November 25, 2022 N 3090/r «On the approval of the Technology of the Dynamic model of loading the infrastructure of JSC «Russian Railways» during the implementation of the process of approval of applications for the carriage of goods and notification requests for the carriage of empty freight wagons» (ed. July 11, 2023)].

8. K dinamicheskoi modeli zagruzki infrastruktury podklyuchilis' vse dorogi (Elektronnyi resurs) [All roads have been connected to the dynamic model of infrastructure loading (Electronic resource)]. Available at: <https://www.gudok.ru/content/freighttrans/1630422/> (Accessed November 16, 2023).

9. DM ZI pozvolyaet mgnovenno reagirovat' na zaprosy GU-12 (Elektronnyi resurs) [The dynamic model of infrastructure loading allows you to instantly respond to the requests of the GU-12 (Electronic resource)]. Available at: <https://intellex.ru/press-center/news-archive/pub-8833947.html> (Accessed November 16, 2023).

10. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed November 16, 2023).

11. Metodika rascheta pokazatelei raboty vagonnykh parkov, pozvolyayushchikh osushchestvlyat' monitoring, analiz i otsenku vliyaniya izbytochnosti parkov na ehffektivnost' i rezul'tativnost' raboty seti»: utverzhdena starshim vitse-prezidentom OAO «RZHD» October 31, 2013 No 361 (red. 12.11.2015) [Methodology for calculating the performance indicators of wagon fleets that allow monitoring, analysis and evaluation of the impact of the wagon parks on the efficiency and effectiveness of the network: approved by Senior Vice-President of JSC «Russian Railways» dated October 31, 2013 (ed. November 12, 2015)].

12. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 26.08.2021 № 1866/r «Ob utverzhdenii klassifikatora mest provedeniya gruzovykh i kommercheskikh operatsii na putyakh obshchego i neobshchego pol'zovaniya» [Order of JSC «Russian Railways» dated August 26, 2021 No 1866/r « On approval of the classifier of places of cargo and commercial operations on public and non-public roads»].

13. Starozhilova A.V., Smolovskaya E.A., Vlasova N.V. Vnedrenie tsifrovyykh platform dokumentooborota dlya avtomatizatsii protsessov gruzoperevozok zheleznodorozhnym transportom [Introduction of digital document management platforms for automation of cargo transportation processes by rail]. *Materialy VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Avtomobilestroenie: proektirovanie, konstruirovaniye, raschet i tekhnologii remonta i proizvodstva»* [Proceeding of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference «Automotive industry: design, construction, calculation and technologies of repair and production»]. Izhevsk, 2023, pp. 569–573.

14. Bachurin V.D., Butorina D.A., Faizrahmanova E.V. Iskusstvennyi intellekt i prognoznaya analitika na zheleznodorozhnym transporte [Artificial intelligence and predictive analytics in railway transport]. *Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Tekhnologii i tekhnika: puti innovatsionnogo razvitiya»* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Technologies and technology: ways of innovative development»]. Voronezh, 2023, pp. 94–98.

15. 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, pp. 012020.

16. Rasporyazhenie OAO «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»].

17. Dinets D.A., Merkulov A.S. Primeneniye 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.

18. Vlasova N.V., Olentsevich V.A., Konyukhov V.Yu., Lysenko D.A. Automated calculation method effect values in load securing elements fixed on a rolling stock. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020. 1064 (2021) 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012042>.

19. Burakova A.V., Ivankova L.N., Kozlov N.S. Issledovanie zaderzhek podvizhnogo sostava na stantsiyakh i podkhodakh k nim [Investigation of rolling stock delays at stations and approaches to them]. *Trudy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya transporta, promyshlennosti i ehkonomiki Rossii»* [Proceedings of the scientific and practical conference «Actual problems and prospects for the development of transport, industry and economy of Russia»]. Voronezh, 2022, pp. 14–18.

20. Ivankova L.N., Ivankov A.N., Volkova S.G. Formirovaniye opornoj seti transportno-logisticheskikh kompleksov [Formation of a backbone network of transport and logistics complexes]. *Sbornik trudov nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the scientific and practical conference with international participation «Innovative technologies in railway transport»]. Moscow, 2022, pp. 177–183.

21. Gantimurova Yu.O. Ob'ektno-orientirovanniy podkhod k modelirovaniyu transportnoi sistemy [Object-oriented approach to modeling of the transport system]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Angarsk State Technical University], 2023, no. 20, pp. 109–116.

### Информация об авторах

**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](mailto:natalya.vlasova.76@list.ru).

**Оленевич Виктория Александровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [olencevich\\_va@mail.ru](mailto:olencevich_va@mail.ru).

### Information about the authors

**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](mailto:natalya.vlasova.76@list.ru).

**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](mailto:olencevich_va@mail.ru).

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА  
ИНФОРМАЦИИ**

**COMPUTER SCIENCE, INFORMATION MANAGEMENT  
AND PROCESSING**

## Исследование распределения вибрации и дефектов вспомогательных машин электровозов

А.В. Лукьянов<sup>1</sup>✉, А.Ю. Перелыгина<sup>2</sup>, Е.В. Каимов<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

✉loukian@inbox.ru

### Резюме

Статья посвящена исследованию вибрации с использованием разработанной в лаборатории технической диагностики Иркутского государственного университета путей сообщения аппаратуры дистанционного измерения вибропараметров с последующей их автоматизированной обработкой и выдачей протоколов вибродиагностики вспомогательных машин грузовых электровозов ВЛ-85 и пассажирских электровозов ЭП-1. Измерения проводились в локомотивных депо «Нижнеудинское» и «Иркутское» перед входом электровозов на текущий и средний ремонт. Обозначенная аппаратура выполнена в виде виброизмерительных блоков с одним или двумя вибродатчиками, установленными на подшипниковых опорах вспомогательных машин, в частности мотор-вентиляторах электровозов. Большое внимание уделено статистической обработке полученного массива виброданных с целью минимизации количества необходимых вибродатчиков, располагаемых только в точках с максимальной вибрацией. Проведенный статистический анализ позволил сократить число датчиков виброизмерительных блоков на каждой вспомогательной машине. Вместо рекомендуемых четырех-пяти датчиков предложено использовать два или даже один датчик, адекватно характеризующий вибрацию вспомогательной машины. Это позволило создать комплект виброизмерительных блоков оптимальной конфигурации – четыре-пять виброизмерительных блока на секцию электровоза (т.е. по количеству вспомогательных машин в секции). Одновременно регистрируя вибрацию всех вспомогательных машин секции электровоза, можно за короткое время собрать весь массив необходимой информации о их вибрации перед заходом электровоза на ремонт. Автоматизированный анализ вибрации и вибродиагностика дефектов с помощью специально разработанной программы «Вибродефект» позволяет осуществлять ремонт вспомогательных машин с учетом фактического состояния.

### Ключевые слова

вспомогательные машины электровозов, мотор-вентиляторы, входной виброконтроль, среднееквадратическое значение виброускорения и виброскорости, снижение вибрации оборудования электровозов, автоматизированная вибродиагностика, ремонт машин

### Для цитирования

Лукьянов А.В. Исследование распределения вибрации и дефектов вспомогательных машин электровозов / А.В. Лукьянов, А.Ю. Перелыгина, Е.В. Каимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4(80). С. 159–173. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).159-173.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 08.12.2023 г.; поступила после рецензирования: 12.12.2023 г.; принята к публикации: 14.12.2023 г.

## Research of vibration distribution and defects of auxiliary machines in electric locomotives

A.V. Luk'yanov<sup>1</sup>✉, A.Yu. Perelygina<sup>2</sup>, E.V. Kaimov<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

✉loukian@inbox.ru

### Abstract

The article is devoted to the study of vibration using the equipment for remote measurement of vibration parameters developed in the laboratory of technical diagnostics of the Irkutsk State Transport University, followed by their automated processing and the issuance of vibration diagnostics protocols for auxiliary machines of VL-85 freight electric locomotives and EP-1 passenger electric locomotives. Measurements were carried out at the «Nizhneudinsk» and «Irkutsk» locomotive depots previous to the entrance of electric locomotives for current and medium repairs. Vibration measuring equipment was made in the form of vibration measuring units with one or two vibration sensors mounted on the bearing supports of auxiliary machines, in particular, electric locomotive fan motors. Much attention is paid to the statistical processing of the received array of vibration data in order to minimize the number of necessary vibration sensors installed only at points with maximum vibration. The statistical analysis made it possible to reduce the number of vibration measuring unit sensors on each auxiliary machine. Instead of the recommended four or five sensors on each auxiliary



machine, it is proposed to reduce their number to two or even one sensor that adequately characterizes the vibration of the auxiliary machine. This made it possible to create a set of vibration measuring units of optimal configuration – four to five vibration measuring units per section of an electric locomotive (i.e., according to the number of auxiliary machines in the section). By simultaneously registering the vibration of all auxiliary machines of an electric locomotive section, it is possible to collect within a short period of time the entire array of necessary information about the vibration of all auxiliary machines of an electric locomotive before it goes into repair. Automated vibration analysis and vibration diagnostics of defects using a specially developed program «Vibration defect» makes it possible to repair auxiliary machines taking into account their actual condition.

### Keywords

auxiliary machines of electric locomotives, fan motors, input vibration control, RMS value of vibration acceleration and vibration velocity, vibration reduction of electric locomotive equipment, automated vibration diagnostics, tire repair

### For citation

Luk'yanov A.V., Perelygina A.Yu., Kaimov E.V. Issledovanie raspredeleniya vibratsii i defektov vspomogatel'nykh mashin elektrovozov [Research of vibration distribution and defects of auxiliary machines in electric locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 159–173. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).159-173.

### Article info

Received: December 8, 2023; Revised: December 12, 2023; Accepted: December 14, 2023.

### Введение

К вспомогательным машинам (ВМ) электровозов с асинхронным электроприводом относятся мотор-компрессоры (МК), фазорасщепители и мотор-вентиляторы (МВ). МВ охлаждают силовое электрическое оборудование, в частности тяговые электродвигатели, тормозные реостаты, выпрямительно-инверторные преобразователи, т.е. оборудование силовой электрической цепи. Другие ВМ создают запасы сжатого воздуха для тормозной системы и преобразуют однофазный ток в трехфазный.

Одними из главных задач на железнодорожном транспорте являются повышение надежности и увеличение межремонтного пробега электровозов за счет своевременной и достоверной диагностики технического состояния оборудования и его качественного технического обслуживания и ремонта при одновременном снижении затрат на эти мероприятия. Основными контролируемыми элементами ВМ по параметрам вибрации являются асинхронные электродвигатели с необходимостью быстрой и достоверной диагностики развивающихся дефектов.

На ВМ электровозов действует силовое инерционное возмущение от дисбалансов вращающихся масс, кинематическое возмущение от движения основания, от соседних работающих МВ, МК [1]. Исследования показывают, что электрические дефекты асинхронного электропривода ВМ, такие как обрыв стержней ротора асинхронного электродвигателя, статический и динамический эксцентриситеты, несим-

метрия тока в фазах, также являются источником повышенных вибраций и вносят вклад до 20–30 % в общий вибрационный фон электровозов [2–6].

Расположение мотор-вентиляторов на секции электровоза ВЛ-85 показано на рис. 1.

Вибрации в широких диапазонах частот приводят к накоплению микрповреждений в деталях, что вызывает появление усталостных трещин и разрушений, пластических деформаций в ответственных деталях [7, 8]. Снижение трения при вибрации приводит к уменьшению практически до нуля предварительных натяжений в болтовых и винтовых соединениях [9]. Вибрации ускоряют износ, причины и следствия высокой вибрации усиливают друг друга, в результате чего приближается полный выход машины из строя [10–12]. Практический опыт показывает, что вибрационный метод контроля технического состояния машинного оборудования является одним из наиболее информативных [13–15]. Любой дефект какого-либо узла, который подвергается механическому воздействию со стороны движущихся частей, характеризуется индивидуальным вибросигналом (смещения, скорости или ускорения) и спектром [5, 7, 8].

Целью данной статьи является исследование вибрационных характеристик ВМ электровозов с использованием разработанных виброизмерительных блоков и программы автоматической обработки данных и диагностики развивающихся дефектов для последующего плани-

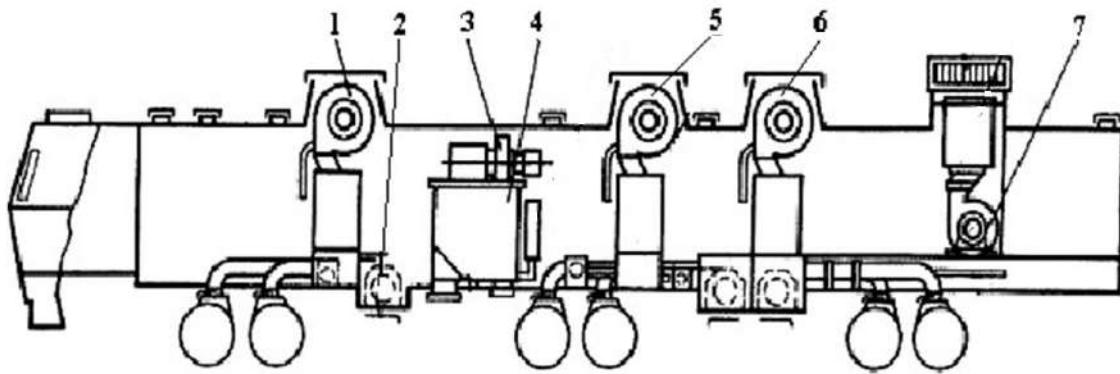


Рис. 1. Система вентиляции электровоза ВЛ-85:

1 – МВ1; 2 – сглаживающий реактор; 3 – МВ4; 4 – трансформатор; 5 – МВ2; 6 – МВ3; 7 – МВ5

Fig. 1. Ventilation system of electric locomotive VL-85:

1 – AM1; 2 – smoothing reactor; 3 – AM4; 4 – transformer; 5 – AM2; 6 – AM3; 7 – AM5  
(AM – auxiliary machine)

рования объемов ремонтных работ с учетом фактического состояния ВМ.

### Виброизмерительный блок с двумя датчиками

В рамках исследования вибрации МВ были проведены измерения пространственного распределения вибрации на мотор-вентиляторах электровозов ВЛ-85 и ЭП-1 ВСЖД с использованием восьмиканальной виброаппаратуры STD-2160 (рис. 2).

Датчики вибрации устанавливались на подшипниковых опорах (точки 1в, 1г, 2в, 2г, 3о, 4г) в вертикальном, горизонтальном, осевом и тангенциальном направлениях. Одновременно измерения вибрации проводились на основании МВ (5в, 5г). Проведенные измерения (более десяти) вибрации на каждом из четырех МВ электровозов ВЛ-85 и ЭП-1 показали, что максимальная вибрация возникает на подшипниковых опорах электродвигателей в горизонтальном и вертикальном направлениях.

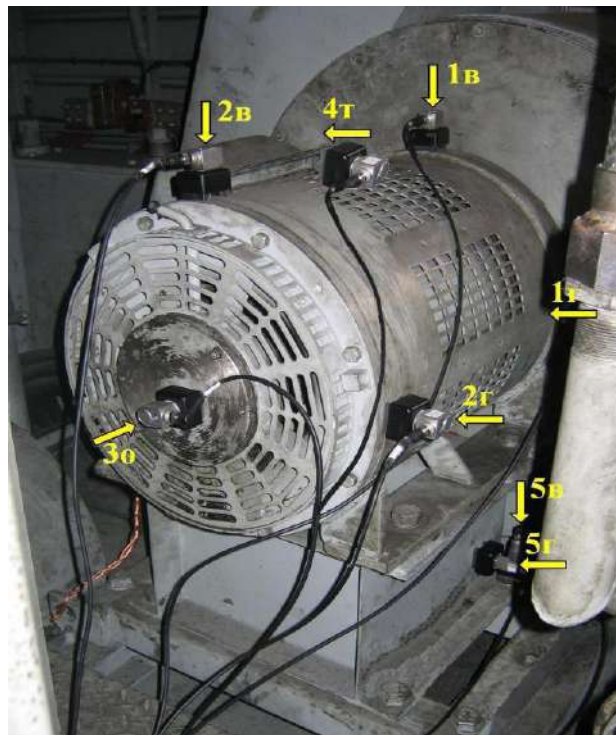


Рис. 2. Точки измерения вибрации на МВ-4 электровоза ЭП-1

Fig. 2. Vibration measurement points on FM-4 of the EP-1 electric locomotive (FM – fan motor)

Данные статистической обработки измерений виброскорости на каждом из четырех МВ электровозов ВЛ-85 показали, что коэффициенты корреляции  $R$  между показаниями датчиков в вертикальном (1в) и горизонтальном (1г) направлениях на передней опоре МВ у центробежного колеса составляют  $R = 0,85$  и, соответственно, между датчиками (2в) и (2г) на задней опоре –  $R = 0,82$ , т.е. связь между показаниями датчиков вибрации в горизонтальном и вертикальном направлениях достаточно высока (см. рис. 2). Это позволило сократить до двух количество датчиков (д1, д2) виброизмерительных блоков (ВИБ) беспроводного многоканального комплекса входного виброконтроля МВ (рис. 3), разработанного в лаборатории технической диагностики Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) [16, 17]. Для регистрации вибрации на каждой опоре (подшипнике) МВ датчик (пьезоакселерометр) устанавливается в горизонтальном или вертикальном направлении.

### Комплекс двухканальных виброизмерительных блоков

Комплекс входного виброконтроля, состоящий из четырех-пяти ВИБ, позволяет одновременно производить измерение вибрации на всех МВ одной секции электровоза при их кратко-

временной работе (не более 1 мин.) под контактной сетью. Управление работой всех ВИБ осуществляется дистанционно из прохода машинного отделения, что позволяет производить измерения вибрации МВ, находящихся в высоковольтной зоне. С целью исключения высокочастотных электромагнитных наводок и воздействия высокого напряжения ВИБ выполнены в помехозащищенном исполнении, имеют автономное питание и дистанционное управление. Одновременно уменьшено количество подключаемых к аппаратуре и датчикам проводов.

Данные о вибрации вспомогательных машин при входе электровоза на ремонт после измерений с использованием ВИБ направляются в базу данных разработанной программы виброанализа и автоматизированной диагностики дефектов ВМ «Вибродефект» [18], которая определяет уровень вибрации (среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости) на подшипниковых опорах ВМ и сравнивает его с нормативным значением; диагностирует виды развивающихся дефектов при высокой вибрации; формирует протокол виброизмерений с рекомендациями по ремонту на основе данных вибродиагностики. Общий вид данного протокола приведен в табл. 1.

В протоколе вибродиагностики МВ при входном контроле приведены данные о СКЗ

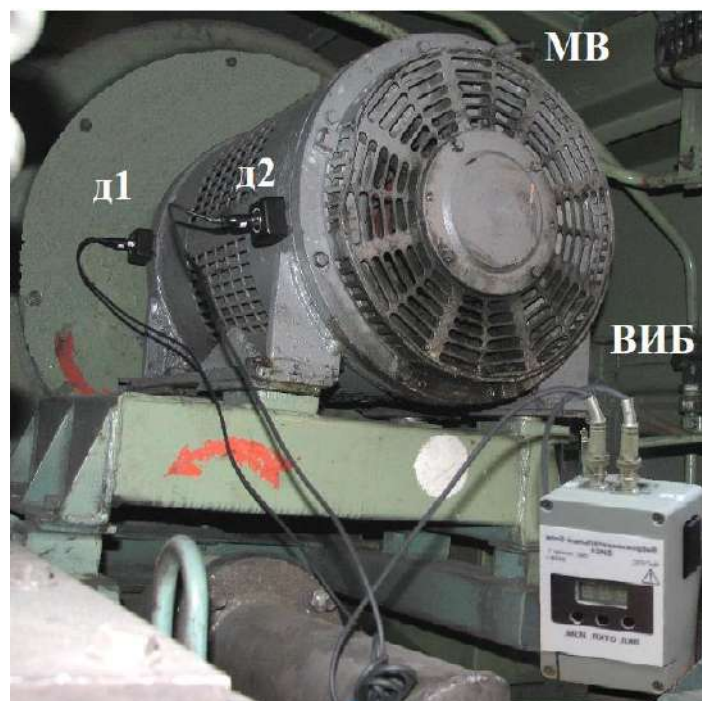


Рис. 3. Установка датчиков виброизмерительного блока на МВ-2 электровоза ВЛ-85  
Fig. 3. Installation of vibration measuring unit sensors on FM-2 of the VL85 electric locomotive

виброскорости всех мотор-вентиляторов (до 5 МВ) двух секций электровозов. Данные виброскорости приведены для радиального подшипника д1 и радиально-упорного подшипника д2 (табл. 1). Ниже производится сравнение СКЗ виброскорости с нормативным значением [19], по результатам которой формируется оценка технического состояния: «допустимо», «требуется принятия мер», «недопустимо» (табл. 1). В строке протокола «диагностика дефектов» приводится до трех дефектов, внесших в процентном отношении наибольший вклад в общий уровень вибрации. Если дефект внес более 50 % вклада в общий уровень вибрации, то отображается только этот дефект (табл. 1). В

строке протокола «рекомендации по ремонту» дается заключение: «балансировка» (при дисбалансе ротора), «ремонт» (в случае дефектов подшипников) или «электрический дефект» в случае общего заключения об уровне вибрации «недопустимо» или «требуется принятия мер». В строках с показаниями СКЗ виброскорости звездочками маркируются показания в случае дополнительного высокого значения СКЗ виброускорения или высокого ПИК-фактора, характерных при значительном износе подшипников, тем самым реализуется технология обслуживания и ремонта ВМ по фактическому состоянию.

**Таблица 1.** Протокол вибродиагностики мотор-вентиляторов электровоза при входном контроле перед ремонтом

**Table 1.** Protocol for vibration diagnostics of electric locomotive fan motors during incoming inspection before repair

ПРОТОКОЛ от «день. месяц. год» вибродиагностики мотор-вентиляторов при входном контроле электровоза № PROTOCOL from «day. month. year» vibration diagnostics of motor fans during incoming inspection of electric locomotive No.										
Датчики и показатели Sensors and indicators	Секция 1 Section 1					Секция 2 Section 2				
	МВ-1	МВ-2	МВ-3	МВ-4	МВ-5	МВ-1	МВ-2	МВ-3	МВ-4	МВ-5
Датчик 1 среднеквадратическое значение скорости (радиальный подшипник), мм/с Sensor 1 RMS speed (radial bearing), mm/s	6,30	4,84	2,28	4,11	–	2,76	12,97**	4,09	4,06**	–
Датчик 2 среднеквадратическое значение скорости (радиально-упорный подшипник), мм/с Sensor 2 RMS speed (angular contact bearing), mm/s	4,45	9,42	2,64	6,22*	–	4,04	11,22**	5,92	11,74	–

Оценка технического состояния: допустимо – до 2,8 мм/с; требуется принятие мер – 2,8–4,5 мм/с; недопустимо – более 4,5 мм/с Technical condition assessment: acceptable – up to 2,8 mm/s; measures are required – 2.8–4.5 mm/s; unacceptable – more than 4,5 mm/s	Недопустимо Unacceptable	Недопустимо Unacceptable	Допустимо Acceptable	Недопустимо Unacceptable	–	Требуется принятие мер Action is required	Недопустимо Unacceptable	Недопустимо Unacceptable	Недопустимо Unacceptable	–
Диагностика дефектов, % Defect diagnostics, %	Ослабление Attenuation 39,2 Расцентровка Misalignment 25,2 Дисбаланс Imbalance 18,2	Дисбаланс Imbalance 58,7	–	Ослабление Attenuation 24,3 Дефект внутреннего кольца Inner ring defect 12,3 Дефект наружного кольца Outer ring defect 12,1	–	Дисбаланс imbalance 52,8 Расцентровка Misalignment 10,8	Повреждение стержней ротора Damage to rotor rods 31,8 Дисбаланс Imbalance 31,3 Ослабление Attenuation 15,8	Ослабление Attenuation 29,1 Дисбаланс Imbalance 24 Расцентровка Misalignment 17	Дефект сепаратора Separator defect 24,1 Дефект внутреннего кольца Inner ring defect 19,1 Дисбаланс Imbalance 13,7	–
Рекомендации по ремонту	Ремонт Repair	Балансировать Balancing	–	Ремонт Repair	–	–	Ремонт Repair	Ремонт Repair	Ремонт Repair	–

**Примечание:**

\* высокое виброускорение, вероятен дефект подшипника; \*\* высокий ПИК-фактор, износ подшипника  
Note:

\* high vibration acceleration, possible bearing defect; \*\* high PIC factor, bearing wear

### Анализ массива виброданных мотор-вентиляторов

С использованием данного многоканального комплекса в 2009–2013 гг проведены измерения и сформированы базы данных вибрации МВ как основных типов вспомогательных машин электровозов ЭП-1 и ВЛ-85 в локомотивных депо «Иркутское» и «Нижеудинское». Базы данных (БД) виброизмерений МВ содержат более 1 100 сигналов виброскорости грузовых электровозов ВЛ-85 и около 200 сигналов виброскорости электровозов ЭП-1.

Проведенная статистическая обработка БД с использованием программы Statistica позволила выявить ряд следующих закономерностей. Для МВ электровозов ВЛ-85 оценка математического ожидания (МО) СКЗ виброскорости составила  $\mu = 5,2$  мм/с; оценка средне-

квадратического отклонения (СКО) СКЗ виброскорости –  $\sigma = 2,8$  мм/с (при предельно допустимом СКЗ виброскорости 4,5 мм/с в соответствии с нормами вибрации [19]), т.е. более чем у половины обследованных МВ электровозов виброскорость оказалась выше предельно допустимой. Оценка МО значений СКЗ виброускорения составила  $\mu = 8,0$  м/с<sup>2</sup>, СКО СКЗ виброускорения –  $\sigma = 4,65$  м/с<sup>2</sup>. Вибрация, воздействующая на МВ электровозов ВЛ-85, очень высока и значительно сокращает фактический межремонтный пробег машин и приводит к внеплановым, преждевременным ремонтам [20]. Виброускорение, характеризующее силовое, динамическое воздействие, близко в среднем к 1g, а энергетическая составляющая вибрации (СКЗ виброскорости) в среднем значительно превышает норму.

Для МВ электровозов ЭП-1 математическое ожидание значений СКЗ виброскорости составило  $\mu = 2,53$  мм/с, СКО СКЗ виброскорости –  $\sigma = 1,23$  мм/с. Математическое ожидание СКЗ виброускорения составило  $\mu = 5,48$  м/с<sup>2</sup>, СКО СКЗ виброускорения –  $\sigma = 3,19$  м/с<sup>2</sup>. Таким образом, вибрационное состояние МВ электровозов ЭП-1 в среднем менее напряженное, чем у электровозов ВЛ-85.

### Корреляция показаний двух датчиков

Исследования с помощью программы Statistica коэффициентов корреляции СКЗ виброскорости и СКЗ виброускорения между датчиком д1 (у центробежного колеса) и датчиком д2 (с другой стороны МВ) по всему массиву 1 100 измерений вибрации МВ электровозов ВЛ-85 показали следующие результаты (табл. 2).

Взаимосвязь показаний датчиков д1 и д2 по виброскорости соответствует качественным характеристикам связи «высокая» (для МВ1 и МВ2), «очень высокая» (МВ3) и «заметная» (МВ4). Коэффициенты корреляции показаний тех же датчиков вибрации по СКЗ виброускорения имеют меньшие значения качественной характеристики силы взаимосвязи и соответствуют оценке «заметная».

Объясняется это тем, что виброскорость по конструкции МВ распространяется на большие расстояния, так как она регистрируется в диапазонах сравнительно низких и средних частот 10–1 000 Гц в которых весьма значительно проявляются такие дефекты всей конструкции мотор-вентиляторов, как дисбаланс ротора (из-за шпоночного соединения центробежного колеса на валу ротора электродвигателя), расцентровка подшипниковых опор, несимметрия тока в трехфазной обмотке статора, механические ослабления в подвижном соединении (посадке)

ротора и статора МВ. Высокочастотная вибрация, регистрируемая в виде сигналов виброускорения в диапазоне 10–5 000 Гц от дефектов подшипников качения, лопастных частот центробежного колеса, статического и динамического эксцентриситета ротора, распространяется на сравнительно небольшие расстояния и фиксируется только датчиками в районе передней и задней опор электродвигателя.

### Взаимная корреляция датчиков

С помощью программы Statistica проведен также множественный регрессионный анализ взаимосвязи вибрации на датчиках д1 или д2 на каждом из четырех МВ с показаниями аналогичных датчиков на остальных трех МВ. В основном это взаимовлияние не обнаружено или это взаимовлияние было слабым.

В частности, некоторая заметная взаимосвязь существует только между показаниями виброскорости (низкочастотный диапазон 10–1 000 Гц) датчиков № 2, установленных на задних опорах электродвигателей МВ-2 и МВ-4; показаниями виброускорения (высокочастотный диапазон 10–5 000 Гц) тех же датчиков на МВ-2 и МВ-3, МВ-2 и МВ-4 соответственно, находящихся на электровозах ВЛ-85 попарно близко друг к другу (см. рис. 1). Между парой МВ-3 и МВ-4 взаимосвязь показаний виброускорения более слабая (умеренная), так как они находятся на большом удалении друг от друга. При этом вибрация между ВИБ передается через опоры и балки основания (табл. 3).

### Одноканальный виброизмерительный блок

С учетом проведенных статистических исследований в лаборатории технической диагностики ИрГУПС был разработан одноканальный ВИБ, выполненный по беспроводной тех-

**Таблица 2.** Величины коэффициентов корреляции среднеквадратических значений виброскорости и виброускорения мотор-вентиляторов

**Table 2.** The values of the correlation coefficients of the RMS values of vibration velocity and vibration acceleration of motor fans

№ мотор-вентилятора Number of fan motor	Коэффициент корреляции $R_c$ среднеквадратического значения виброскорости мотор-вентилятора Correlation coefficient $R_c$ RMS value vibration speed of the fan motor	Коэффициент корреляции $R_y$ среднеквадратического значения виброускорения мотор-вентилятора Correlation coefficient $R_y$ RMS value vibration acceleration of the fan motor
1	0,73	0,53
2	0,79	0,56
3	0,93	0,69
4	0,52	0,66

**Таблица 3.** Результаты множественного регрессионного анализа взаимосвязи показаний датчиков виброизмерительных блоков, установленных на МВ-2–МВ-4

**Table 3.** Results of multiple regression analysis of the relationship between sensor readings of vibration measuring units installed on MV-2–MV-4

Вид сигнала Signal type	Датчик (x) Sensor (x)	Мотор-вентилятор Fan motor	Коэффициент корреляции $R_{xy}$ и вид взаимосвязи Coefficient $R_{xy}$ correlations and type of relationship	Датчик (y) Sensor (y)	Мотор-вентилятор Fan motor
Среднеквадратическое значение виброскорости RMS vibration velocity value	д2	МВ-2	0,51 (заметная) perceptible	д2	МВ-4
		МВ-3	0,48 (умеренная) moderate		МВ-4
МВ-2		0,61 (заметная) perceptible	МВ-3		
МВ-2		0,59 (заметная) perceptible	МВ-4		
Среднеквадратическое значение виброускорения RMS Vibration acceleration value					

нологии (рис. 4), который позволяет формировать гибкую виброизмерительную схему одновременного контроля вибрации всех вспомогательных машин секции электровоза при их одновременной прокрутке под контактной сетью. На рис. 5 приведен вариант размещения одноканальных ВИБ на двух подшипниковых опорах ВИБ.



**Рис. 4.** Одноканальный

Виброизмерительный модуль:

- 1 – виброизмерительный блок; 2 – индикатор измерений и кнопки управления; 3 – антенна; 4 – разъем USB; 5 – магнит крепления блока; 6 – пульт дистанционного управления; 7 – ноутбук с программой «Вибродефект»

**Fig. 4.** Single-channel vibration measuring module:  
1 – vibration measuring unit; 2 – measurement indicator and control buttons; 3 – antenna; 4 – USB connector; 5 – block mounting magnet; 6 – remote control; 7 – laptop with the «Vibrodefect» program



**Рис. 5.** Мотор-вентилятор

с виброизмерительными модулями

**Fig. 5.** Fan motor with vibration measuring modules

Данный одноканальный ВИБ защищен металлическим корпусом от мощных электромагнитных полей машинного отделения электровоза, датчик вибрации встроен в корпус ВИБ и не имеет соединительных проводов, расположенных вне корпуса ВИБ, как, например, в двухканальном варианте ВИБ (см. рис. 2). Время прокрутки ВМ и контроля с одновременной регистрацией вибросигналов – не более 1 мин.

С учетом проведенных статистических исследований корреляции (см. табл. 2) показаний датчиков д1 (у центробежного колеса) и датчиков д2 (с другой стороны электродвигателя МВ) можно оценивать вибрационное состояние каждого МВ по показаниям только одного датчика

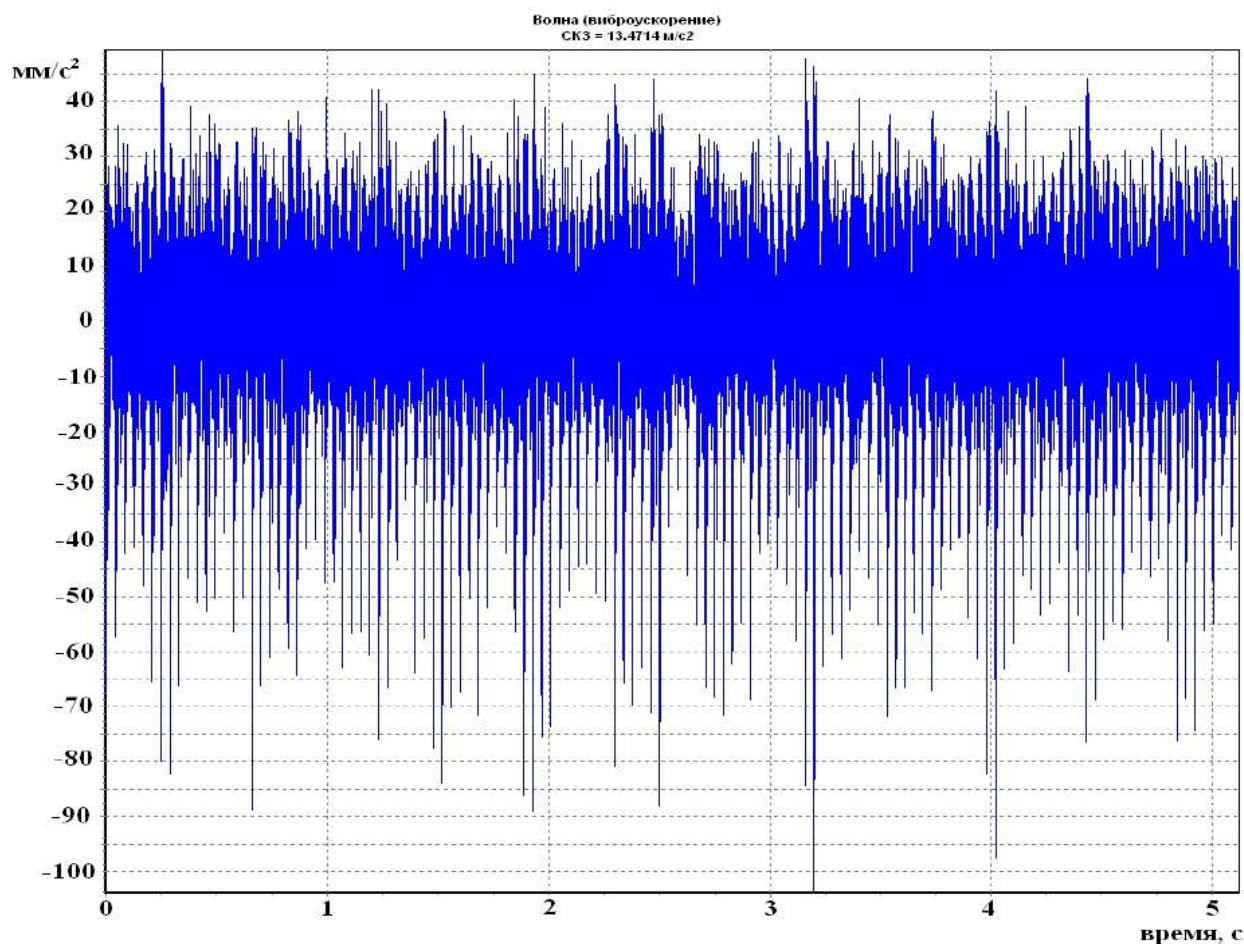
вибрации, например датчика д2, расположенного на подшипниковом щите у задней опоры электродвигателя с другой стороны от центрального колеса (см. рис. 5). Это в два раза сократит необходимое число ВИБ и увеличит эффективность капиталовложений в систему входного контроля ВМ перед ремонтом. Для контроля вибрации ВМ секции электровоза понадобится не более 5 ВИБ (по числу ВМ в секции).

Преимущества предлагаемых конструкций ВИБ: одновременный контроль вибрации всех ВМ секции электровоза при входе на ремонт, что позволяет производить ремонт с учетом технического состояния ВМ. Модульно-распределенная система измерения и регистрации вибрации вспомогательных машин электровозов на основе одноканальных ВИБ, позволяет формировать любую конфигурацию и число каналов измерительной системы. На виброизмерительный модуль получен патент [17].

На программу автоматизированной вибродиагностики дефектов ВМ «Вибродефект» получено свидетельство [18].

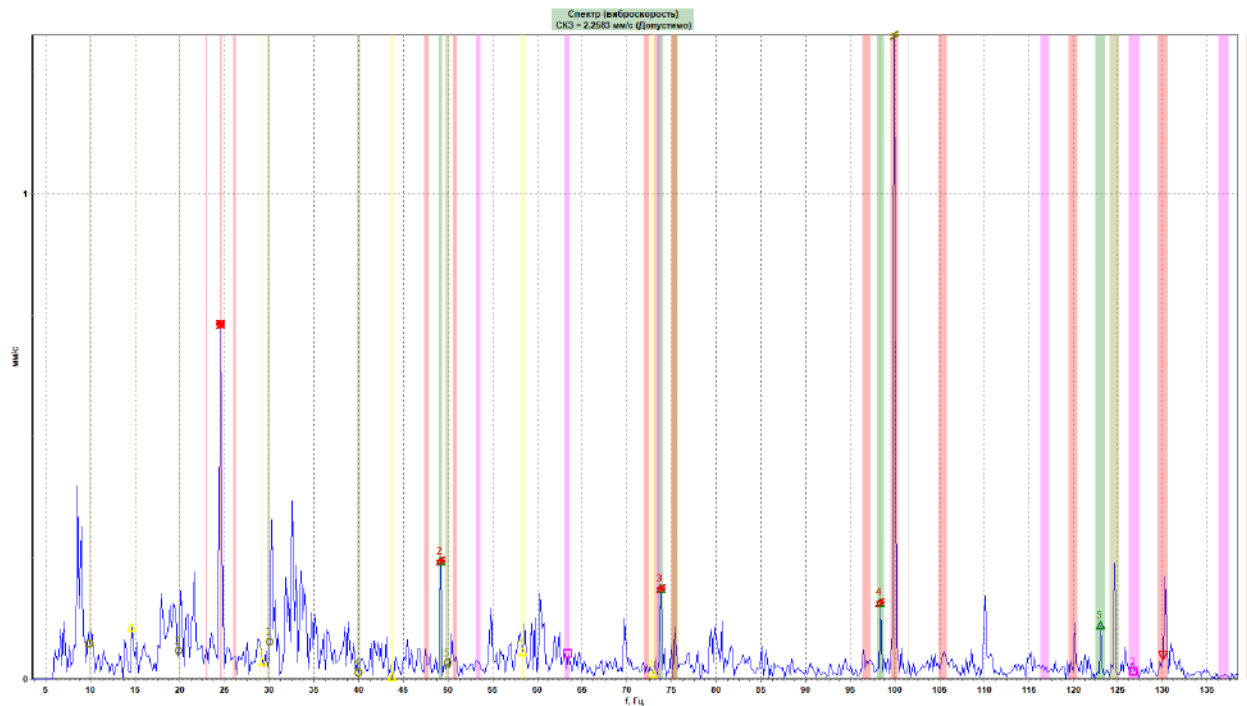
### Программа «Вибродефект»

Программа «Вибродефект» кроме формирования протокола виброизмерений (см. рис. 4) позволяет проводить анализ каждого вибросигнала индивидуально: проанализировать его вид (рис. 6), определить ПИК-фактор (импульсность сигнала), СКЗ, получить спектры виброскорости, вибросмещения и виброускорения с наложением маски характерных частот дефектов (рис. 7). Программа имеет широкий набор инструментов для вычисления характерных частот дефектов ВМ, суммарного значения СКЗ виброскорости на этих частотах и оценки этого вклада в СКЗ виброскорости во всем диапазоне частот 10–5 000 Гц.



**Рис. 6.** Пример сигнала виброускорения вспомогательной машины при дефекте «механическое ослабление»  
**Fig. 6.** An example of a vibration acceleration signal of an auxiliary machine under a «mechanical weakening» defect





**Курсор**  
f = 24.6075Гц, 0.7317мм/с

**Полосы частот дефектов**

<input checked="" type="checkbox"/> Курсор	
<input checked="" type="checkbox"/> Обратная частота	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Гармоника ОЧ	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Дефект сепаратора	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Дефект внутреннего кольца	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Дефект наружного кольца	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Дефект тел качения	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Повреждение стержней ротора	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Несимметричный режим нагрузки	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Стат. эксцентриситет	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Дин. эксцентриситет ротора	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Номер гармоники	

**Оборотная частота**  
24.6075

Только максимум в полосе

**Диагностировать**

**Диагностика**

<input checked="" type="checkbox"/> Электрические дефекты: 1.8541 (37.7%)
<input checked="" type="checkbox"/> Механические дефекты: 1.8325 (37.3%)
<input checked="" type="checkbox"/> Дефекты подшипника: 1.2266 (25.0%)

**Рис. 7.** Спектр виброскорости с наложением маски характерных частот дефектов  
**Fig. 7.** Vibration velocity spectrum with overlay of a mask of defects' characteristic frequencies

Для анализируемого массива 1 100 измерений вибрации МВ электровозов ВЛ-85 получено распределение видов дефектов (рис. 8). Результаты вибродиагностики (рис. 9) отображаются в правой части спектра (см. рис. 7) и показывают процент вклада характерных спектральных компонентов дефектов в общее СКЗ вибрации МВ в контролируемой точке.

По результатам автоматизированной вибродиагностики ВМ перед заходом электровозов на ремонт возможны следующие действия:

- при обнаружении дисбаланса ротора ВМ необходимо значительно уменьшить вибрацию путем балансировки ротора в собственных подшипниках с использованием стандартных функций виброанализатора (например, STD-3300), что значительно увеличит межремонтный ресурс ВМ;

- при дефекте подшипников необходима их замена при ремонте и проверка вибрации при выходе из ремонта;

- при электрическом дефекте необходим ремонт электродвигателя ВМ или контроль величины несимметрии тока в цепи питания электродвигателя;

- виброконтроль ВМ на выходе из ремонта позволит оценить качество ремонта и обеспечить безаварийную работу ВМ во время эксплуатации.

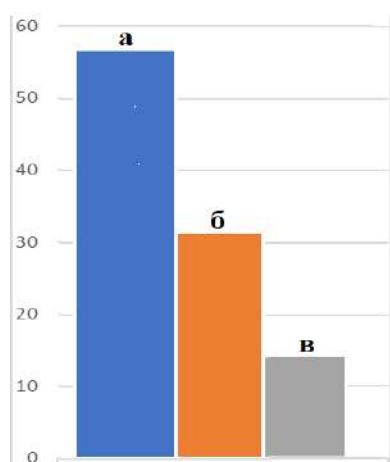


Рис. 8. Распределение дефектов мотор-вентиляторов по видам:

*а* – механические (55,1 %); *б* – дефекты подшипников (30,8 %); *в* – электрические дефекты (14,1 %)

**Fig. 8.** Distribution of motor fan defects by type:

*a* – mechanical (55.1%); *b* – bearing defects (30.8%);

*c* – electrical defects (14.1%)

Контроль вибрации ВМ электровозов при техническом осмотре (в случае необходимости) и перед заходом электровоза на ремонт позволяет оптимизировать объем ремонтных работ и выполнять только те ремонтные операции, которые действительно необходимы. Как показывают исследования в области вибродиагностики машинного оборудования, проведение работ по снижению уровня вибрационного фона в электровозах может принести ощутимые экономические выгоды за счет повышения производительности, увеличения межремонтного пробега и снижения расходов на обслуживание и ремонт оборудования.

Применение комплекса вибродиагностики на основе разработанной аппаратуры ВИБ и программы «Вибродефект» реализует два метода анализа собранных данных:

- с помощью автоматизированного генерирования протокола результатов обработки сигналов виброскорости;

- с помощью детального индивидуального анализа вибрации, измеренной датчиками.

### Результаты автоматизированной вибродиагностики

Методом генерирования протокола результатов диагностики обеспечивается высокая производительность обработки данных и формирование стандартных выводов по реагированию на высокую вибрацию и методов ее устра-

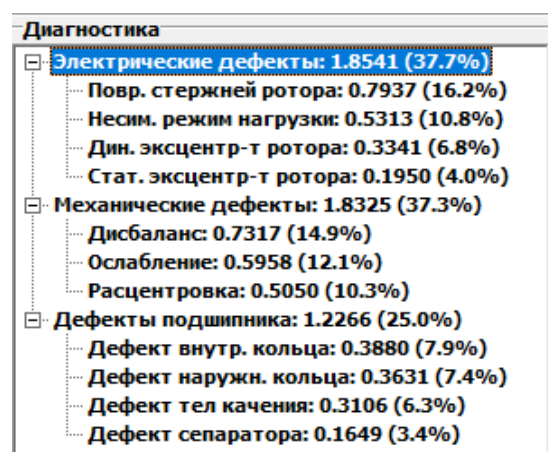
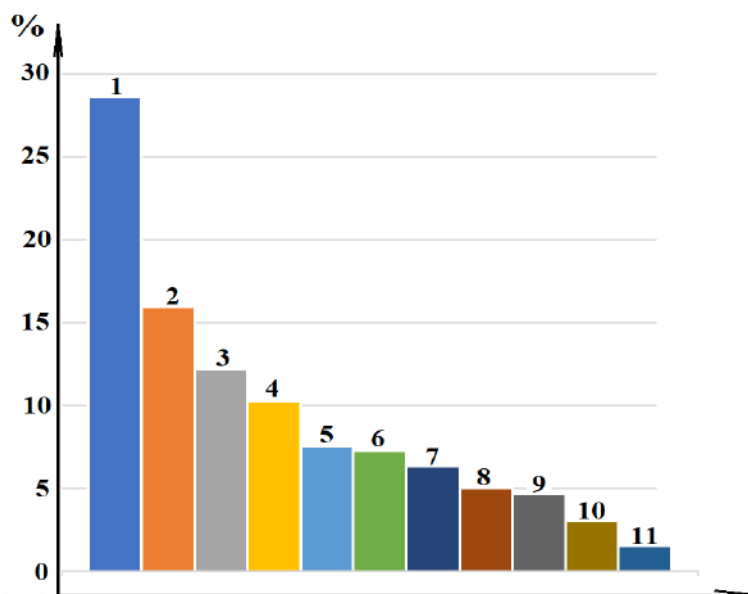


Рис. 9. Пример результатов диагностики дефектов в программе «Вибродефект»

**Fig. 9.** An example of the results of defect diagnostics in the «Vibrodefect» program



**Рис. 10.** Распределение процента вклада дефектов в общем уровне вибрации:

- 1 – дисбаланс; 2 – механическое ослабление; 3 – расцентровка; 4 – повреждение стержней ротора;  
 5 – дефект внутреннего кольца подшипника; 6 – дефект наружного кольца подшипника;  
 7 – дефект тел качения подшипника; 8 – динамический эксцентриситет ротора; 9 – несимметрия тока;  
 10 – статический эксцентриситет ротора; 11 – дефект сепаратора

**Fig. 10.** Distribution of the percentage contribution of defects to the overall vibration level:

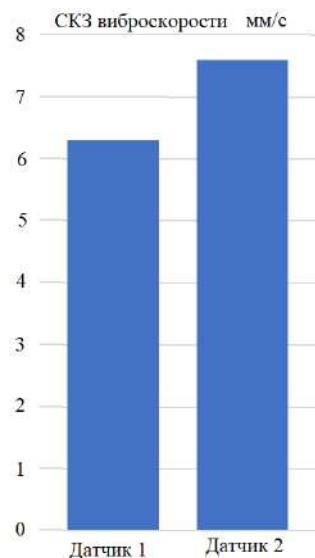
- 1 – imbalance; 2 – mechanical weakening; 3 – misalignment; 4 – damage to the rotor rods;  
 5 – defect of the inner ring of the bearing; 6 – defect of the outer ring of the bearing;  
 7 – defect of the rolling elements of the bearing; 8 – dynamic eccentricity of the rotor; 9 – current asymmetry;  
 10 – static eccentricity of the rotor; 11 – separator defect

нения. Индивидуальный анализ вибросигнала или спектров позволяет уточнить диагноз технического состояния ВМ.

На рис. 10 приведены результаты распределения процентного вклада дефектов в общий уровень вибрации ВМ. Более половины дефектов ВМ составляют механические дефекты: дисбаланс, механическое ослабление, расцентровка. Наиболее распространенным дефектом является дисбаланс – 28 %. Два первых дефекта (44 % дефектов) могут быть ликвидированы при балансировке ротора в собственных опорах и при устранении люфтов в неподвижных соединениях ВМ. Дефект «дисбаланс» может быть ошибочно поставлен в случае резонанса механической системы вспомогательной машины, который проявляется в случае снижения собственной частоты крепления ВМ к основанию. Резонанс выявляется дополнительным исследованием собственной частоты колебаний ВМ при импульсном механическом воздействии на станину ВМ.

На рис. 11 приведен средний уровень СКЗ виброскорости зарегистрированный на

датчиках д1 и д2 ВИБ массива измерений вибрации на МВ электровозов ВЛ-85.



**Рис. 11.** Средний уровень среднеквадратических значений виброскорости на датчиках д1 и д2 виброизмерительного блока

**Fig. 11.** Average level of rms vibration velocity values on sensors d1 and d2 of the vibration measuring unit

При использовании одноканального ВИБ (см. рис. 5) наиболее рационально устанавливать единственный датчик в районе задней опоры электродвигателя с другой стороны от центробежного колеса. Датчики следует размещать на подшипниковых щитах электродвигателя в вертикальном или горизонтальном направлениях, т.е. в точках максимально близких к подшипникам. Другое расположение датчиков на мотор-вентиляторе (например, на кожухе корпуса) может привести к существенной погрешности измерения уровня вибрации.

### Заключение

Рассмотренные конструкции модульных ВИБ с одним или двумя датчиками вибрации способствуют формированию оптимальной структуры измерительной системы, дающей возможность зарегистрировать вибрацию на

всех ВМ секции электровоза перед началом ремонта электровоза. Данные конструкции ВИБ позволяют свести к минимуму количество проводов, создающих помехи при измерениях в высоковольтном машинном отделении электровоза. Управление синхронным включением и отключением ВИБ производится из прохода машинного отделения. Передача данных в программу «Вибродефект» осуществляется через USB-порт ВИБ. Программа «Вибродефект» способна одновременно провести анализ и вибродиагностику дефектов всех ВМ электровоза и выдать заключение в виде протокола. Данные, приведенные в протоколе вибродиагностики, позволяют гибко планировать объем и содержание ремонтных работ, т.е. перейти к обслуживанию и ремонту вспомогательных машин по фактическому состоянию.

### Список литературы

1. Романовский А.И. Динамика вентиляционных машин с асинхронным электроприводом при несимметрии фазных токов : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012. 219 с.
2. Романовский А.И. Исследование вибрационных признаков несимметричных режимов работы вспомогательных машин электровозов // Информационные и математические технологии в науке и управлении : тр. XVI Байкал. Всерос. конф. Иркутск, 2010. Т. 2. С.101–108.
3. Романовский А.И. Исследование вибрационных признаков электрических дефектов вспомогательных машин электровозов // Проблемы механики современных машин : материалы IV Междунар. конф. Улан-Удэ, 2009. Т. 4. С.150–154.
4. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М. : Машиностроение, 1987. 282 с.
5. Васильевский Ю.Н., Гераскин А.А. Анализ сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых асинхронных двигателях на основе математических моделей вибровозмущающих электромагнитных сил // Электротехника и электромеханика. 2010. № 5. С. 12–16.
6. Попков В.И., Мышинский Э.Л., Попков О.И. Виброакустическая диагностика в судостроении. Л. : Судостроение, 1989. 256 с.
7. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
8. Барков А.В., Борисов А.А. Современные возможности диагностирования машин с электроприводом по току двигателя // Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 1 (31). С. 61–65.
9. Лукьянов А.В., Пономорёва Ю.В. Исследование вибрации вспомогательных машин пассажирских электровозов // Молодая наука Сибири. 2020. № 4 (10). С. 248–256. URL: [https://mnv.irkups.ru/sites/default/files/articles\\_pdf\\_files/ronamoreva\\_lukyuanov.pdf](https://mnv.irkups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/ronamoreva_lukyuanov.pdf) (дата обращения 27.11.2023).
10. Биргер И.А. Техническая диагностика. М. : Машиностроение, 1978. 240 с.
11. Явленский К.Н., Явленский А.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. Л. : Машиностроение, 1983. 239 с.
12. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова и др. М. : Наука, 1984. 119 с.
13. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. Пермь : Вибро-Центр, 2012. 198 с.
14. Неразрушающий контроль : справочник. / под ред. В.В. Клюева. Т. 7, Кн. 1-2. М. : Машиностроение. 2006. 829 с.
15. Барков А.В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по их виброакустическим характеристикам // Судостроение. 1985. № 3. С. 21–23.
16. Разработка комплекса входного виброконтроля мотор-вентиляторов электровозов / А.В. Лукьянов, А.Ю. Портной, В.Ю. Гарифулин и др. // Проблемы механики современных машин : материалы IV Междунар. конф. Улан-Удэ, 2009. Т. 1. С. 252–256.
17. Пат. № 2492441, Рос. Федерация. Устройство для измерения вибрации / А.Ю. Портной, А.В. Лукьянов, Н.Ю. Лебедева и др. № 2010118565/28 : заявл. 07.05.2010 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. 8 с.
18. Свидетельство № 2011610455. Вибродефект. Версия 1.1.1 / А.В. Лукьянов, В.Ю. Гарифулин, В.Н. Перелыгин и др. № 2010615511 : заявл. 08.09.2010 ; опубл. 11.01.2011.

19. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15 000 мин<sup>-1</sup>. Введ. 2007–11–01. М. : Стандартинформ, 2007. 14 с.

20. Ширман А.Р., Соловьёв А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М. : Наука, 1996. 276 с.

### References

1. Romanovskii A.I. Dinamika ventilyatsionnykh mashin s asinkhronnym elektroprivodom pri nesimmetrii faznykh tokov [Dynamics of ventilation machines with asynchronous electric drive with phase current asymmetry]. Ph.D.'s thesis. Irkutsk, 2012. 219 p.

2. Romanovskii A.I. Issledovanie vibratsionnykh priznakov nesimmetrichnykh rezhimov raboty vspomogatel'nykh mashin elektrovozov [Investigation of vibrational signs of asymmetric modes of operation of auxiliary machines of electric locomotives]. *Trudy XVI Baikal'skoi Vserossiiskoi konferentsii «Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii»* [Proceedings of the XVI Baikal All-Russian Conference «Information and mathematical technologies in science and management»]. Irkutsk, 2010, vol. 2, pp. 101–108.

3. Romanovskii A.I. Issledovanie vibratsionnykh priznakov elektricheskikh defektov vspomogatel'nykh mashin elektrovozov [Research of vibration signs of electrical defects of auxiliary machines of electric locomotives]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy mekhaniki sovremennykh mashin»* [Proceedings of the IV International Conference «Problems of mechanics of modern machines»]. Ulan-Ude, 2009, vol. 4, pp. 150–154.

4. Genkin M.D., Sokolova A.G. Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 282 p.

5. Vas'kovskii Yu.N., Geraskin A.A. Analiz signalov datchikov vibratsii v korotkozamknutykh asinkhronnykh dvigatelyakh na osnove matematicheskikh modelei vibrovzmozhashchayushchikh elektromagnitnykh sil [Analysis of vibration sensor signals in short-circuited asynchronous motors based on mathematical models of vibration-disturbing electromagnetic forces]. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics], 2010, no. 5, pp. 12–16.

6. Popkov V.I., Myshinskii E.L., Popkov O.I. Vibroakusticheskaya diagnostika v sudostroenii [Vibroacoustic diagnostics in shipbuilding]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1989. 256 p.

7. Shubov I.G. Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 208 p.

8. Barkov A.V., Borisov A.A. Sovremennye vozmozhnosti diagnostirovaniya mashin s elektroprivodom po toku dvigatelya [Modern possibilities of diagnosing machines with electric motor current]. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment], 2013, no. 1 (31), pp. 61–65.

9. Luk'yanov A.V., Ponamoreva Yu.V. Issledovanie vibratsii vspomogatel'nykh mashin passazhirskikh elektrovozov [Investigation of vibration of auxiliary machines of passenger electric locomotives]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no. 4 (10), pp. 248–256.

10. Birger I.A. Tekhnicheskaya diagnostika [Technical diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p.

11. Yavlenskii K.N., Yavlenskii A.K. Vibrodiagnostika i prognozirovaniye kachestva mekhanicheskikh sistem [Vibration diagnostics and prediction of the quality of mechanical systems]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1983. 239 p.

12. Balitskii F.Ya., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Khomyakov E.I. Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayushchikhsya defektov [Vibroacoustic diagnostics of incipient defects]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 119 p.

13. Rusov V.A. Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam [Diagnostics of rotating equipment defects by vibration signals]. Perm': Vibro-Tsentr Publ., 2012. 198 p.

14. Nerazrushayushchii kontrol': spravochnik v 8 t. T. 7 (v 2-kh knigakh) [Non-destructive testing: handbook in 8 vol. Vol. 7 (in 2 books)]. Ed. by. Klyuev V.V. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 829 p.

15. Barkov A.V. Diagnostika i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya podshipnikov kacheniya po ikh vibroakusticheskim kharakteristikam [Diagnostics and forecasting of the technical condition of rolling bearings according to their vibroacoustic characteristics]. *Sudostroenie* [Shipbuilding], 1985, no. 3, pp. 21–23.

16. Luk'yanov A.V., Portnoi A.Yu., Garifulin V.Yu., Romanovskii A.I. Razrabotka kompleksa vkhodnogo vibrokontrolya motor-ventilyatorov elektrovozov [Development of a complex for input vibration control of electric locomotive motor fans]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy mekhaniki sovremennykh mashin»* [Proceedings of the IV International Conference «Problems of mechanics of modern machines»]. Ulan-Ude, 2009, vol. 1, pp. 252–256.

17. Portnoi A.Yu., Luk'yanov A.V., Lebedeva N.Yu., Luk'yanov D.A., Romanovskii A.I. Patent RU 2492441 C2, 10.09.2013.

18. Luk'yanov A.V., Garifulin V.Yu., Perelygin V.N., Luk'yanov D.A., Romanovskii A.I. Certificate of registration of a computer program 2011610455, 11.01.2011.

19. GOST ISO 10816-3-2002. Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenii vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh. Ch. 3. Promyshlennyye mashiny nominal'noi moshchnost'yu bolee 15 kVt i nominal'noi skorost'yu ot 120 do 15 000 min<sup>-1</sup> [State Standard ISO 10816-3-2002. Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ]. Moscow: Standartinform Publ., 2007. 14 p.

20. Shirman A.R., Solov'ev A.B. Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya [Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of mechanical equipment]. Moscow: Nauka Publ., 1996. 276 p.

**Информация об авторах**

**Лукьянов Анатолий Валерианович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: loukian@inbox.ru.

**Перельгина Александра Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной и компьютерной графики, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: perelygina@istu.edu.

**Каймов Евгений Витальевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru.

**Information about the authors**

**Anatolii V. Luk'yanov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: loukian@inbox.ru.

**Alexandra Yu. Perelygina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Engineering and Computer Graphics, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: perelygina@istu.edu.

**Evgenii V. Kaimov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Building Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru.

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

**№ 4 ( 80 )**  
**2 0 2 3**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

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

Подписано в печать 29.12.2023. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 29.12.2023

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,48.

Уч.-изд. л. 13,54. Тираж 500 экз. Заказ № 3699

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) 63-83-74, 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)