

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

ISSN 1813-9108 (Print)

# Современные технологии Системный анализ Моделирование

2024  
№ 2 (82)

Иркутский государственный  
университет путей сообщения

Машиностроение • Транспортные системы • Информационные технологии



2024 № 2(82)  
No. 2(82)

Machine Building • Transport Systems • Information Technology

# Modern technologies System analysis Modeling

2024  
No. 2 (82)

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

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

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

**№ 2 (82)**

**2 0 2 4**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **Ю.А. Трофимов**  
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, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

#### Главный редактор

Ю. А. Трофимов, канд. техн. наук, доц., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

#### Заместители главного редактора

Е.Ю. Дульский, д-р техн. наук, доц. Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Д.В. Буторин, канд. техн. наук, Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

#### Редакционный совет

В.А. Анисимов, д-р техн. наук, доц., Петербургский государственный университет путей сообщения (г. Санкт-Петербург, РФ)

С.А. Бессоненко, д-р техн. наук, проф., Сибирский государственный университет путей сообщения (г. Новосибирск, РФ)

И.В. Бычков, д-р техн. наук, академик РАН, проф., Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения РАН (г. Иркутск, РФ)

В.Е. Гозбенко, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

А.Л. Казаков, д-р физ.-мат. наук, проф., РАН, Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения РАН (г. Иркутск, РФ)

Ю.М. Краковский, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

А.В. Крюков, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Н.А. Махутов, д-р техн. наук, член-корреспондент РАН, профессор, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (г. Москва, РФ)

В.В. Москвичев, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Красноярский филиал – специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» ФИЦ ИВЦ (г. Красноярск, РФ)

А.В. Мурыгин, д-р техн. наук, проф., Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева (г. Красноярск, РФ)

Н.С. Нестерова, д-р техн. наук, доц., Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск, РФ)

С.И. Носков, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

С.М. Овчаренко, д-р техн. наук, проф., Омский государственный университет путей сообщения (г. Омск, РФ)

В.А. Подвербный, д-р техн. наук, проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (г. Иркутск, РФ)

Р. Энхбат, д-р физ.-мат. наук, проф., Монгольский национальный университет (г. Улан-Батор, Монголия)

Здислав Якиевич, д-р техн. наук, проф., Университет штата Аризона (США)

А.С. Янюшкин, д-р техн. наук, проф., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (г. Чебоксары, РФ)

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

**Телефон:** +7(3952) 63-83-74

**e-mail:** stsam@irgups.ru

**Сайт:** <http://stsam.irgups.ru> (<http://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>)

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)

2024  
No. 2 (82)  
Published quarterly

Founded in 2004

## Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

### Priority goals of the journal

- 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.

### Strategic objectives

- 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

**Yu.A. Trofimov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

### Deputy Editor-in-Chief

**E.Yu. Dul'skii**, D.Sc. in Engineering, Associate Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

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

### Editorial council

**V.A. Anisimov**, D.Sc. in Engineering, Associate Prof., Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Saint Petersburg, Russian Federation)

**S.A. Bessonenko**, D.Sc. in Engineering, Associate Prof., Siberian Transport University (Novosibirsk, Russian Federation)

**I.V. Bychkov**, D.Sc. in Engineering, Academician of RAS, Prof., Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of RAS (Irkutsk, Russian Federation)

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

**A.L. Kazakov**, D.Sc. in Physics and Mathematics, Prof. RAS, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of RAS (Irkutsk, Russian Federation)

**Yu.M. Krakovskiy**, 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)

**N.A. Makhutov**, D.Sc. in Engineering, corresponding member of the RAS, Prof., Mechanical Engineering Research Institute of the RAS (Moscow, Russian Federation)

**V.V. Moskvichyov**, D.Sc. in Engineering, Prof., Krasnoyarsk Branch Office of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS (Krasnoyarsk, Russian Federation)

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

**N.S. Nesterova**, D.Sc. in Engineering, Associate Prof., Far Eastern State Transport University (Khabarovsk, Russian Federation)

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

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

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

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

**Editorial address:** 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russian Federation

**Tel.:** +7(3952) 63-83-74 **e-mail:** stsam@irgups.ru

**Web-Site:** <http://stsam.irgups.ru> (<http://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>)

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

### Транспортные системы

<b>Крюков А.В., Овечкин И.С.</b> Моделирование режимов однофазных замыканий в системах электроснабжения нетяговых потребителей.....	10
<b>Савельев М.М., Федорова В.И., Жавыркин В.В.</b> Анализ прочности и модернизация конструкции области шкворневой балки главной рамы специального подвижного состава .....	24
<b>Маломыжев О.Л., Маломыжев Д.О., Павлов С.В., Семенов А.Г.</b> Гидравлическая стабилизация крена вагона .....	35
<b>Горшков В.В., Оленцевич В.А.</b> Причины снижения маршрутизации порожних полувагонов на Восточном полигоне железных дорог и пути их устранения .....	44
<b>Власова Н.В., Брытков В.С.</b> Анализ объемных и качественных показателей работы Восточно-Сибирского территориального Центра фирменного транспортного обслуживания с целью совершенствования качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта .....	54
<b>Пузина Е.Ю., Крапивин М.И., Куцкий А.П.</b> Повышение надежности работы устройств дистанционного управления и мачтовых разъединителей .....	66
<b>Мельниченко О.В., Линьков А.О., Коновалов А.В., Кахаев С.А.</b> Способ диагностирования гидравлических гасителей колебаний на тяговом подвижном составе.....	79
<b>Шарова В.О.</b> Применение LSTM-моделей в задачах моделирования и прогнозирования геометрии рельсовой колеи.....	89
<b>Третьяков Е.А., Шилияков А.П., Соловьев А.Н.</b> Автоматизация процесса устранения неисправностей электропоездов в пути следования .....	98
<b>Рубцов К.Д., Жуйко Л.И.</b> Повышение энергоэффективности железнодорожного транспорта путем применения мобильных устройств поперечной емкостной компенсации .....	111
<b>Худоногов И.А., Галков А.А.</b> Моделирование и анализ токов короткого замыкания системы тягового электроснабжения 1×25 кВ в программе SimInTech на различных ступенях регулирования напряжения устройства РПН.....	123

**Информационные технологии**

<b>Репецкий О.В., Нгуен Ван Мань</b> Верификация разработанных математических моделей и созданного программного обеспечения на тестовых моделях пластин и академических рабочих колесах осевых турбомашин .....	134
<b>Краковский Ю.М., Крамынина Г.Н.</b> Обобщенное прогнозирование оборота вагона по комплексной модели, учитывающей статистическую и экспертную информацию.....	145
<b>Елпашев С.Ю.</b> Анализ основных показателей работы схемы электроснабжения распределительных электрических сетей г. Чита.....	154

## CONTENTS

### Transport Systems

<b>Kryukov A.V., Ovechkin I.S.</b> Modeling of single-phase fault modes in power supply systems of non-traction consumers.....	10
<b>Savel'ev M.M., Fedorova V.I., Zhavyrkin V.V.</b> Stress analysis and design upgrade of the center pivot beam area of the underframe of specialized roll-ing stock.....	24
<b>Malomyzhev O.L., Malomyzhev D.O., Pavlov S.V., Semenov A.G.</b> Hydraulic stabilization of the wagon heeling .....	35
<b>Gorshkov V.V., Olentsevich V.A.</b> Reasons for reducing the routing of empty gondola wagons at the Eastern Railway Polygon and ways to eliminate them .....	44
<b>Vlasova N.V., Brytkov V.S.</b> Analysis of volume and quality indicators of the East Siberian territorial Center of corporate transport services in order to improve the quality of services provided to railway transport customers.....	54
<b>Puzina E.Yu., Krapivin M.I., Kutsyi A.P.</b> Improving the reliability of remote control devices and mast disconnectors .....	66
<b>Mel'nichenko O.V., Lin'kov A.O., Konovalov A.V., Kakhaev S.A.</b> A method for diagnosing hydraulic vibration dampers on traction rolling stock .....	79
<b>Sharova V.O.</b> Application of LSTM-models in problems of modeling and forecasting the geometry of a rail track .....	89
<b>Tret'yakov E.A., Shilyakov A.P., Solov'ev A.N.</b> Automation of the troubleshooting process in electric locomotives in route by train .....	98
<b>Rubtsov K.D., Zhuiko L.I.</b> Improving the energy efficiency of railway transport by using mobile devices of transverse capacitive compensation .....	111
<b>Khudonogov I.A., Galkov A.A.</b> Modeling and analysis of short-circuit currents of a 1×25 kV traction power supply system in the SimInTech program at various stages of voltage regulation of the OLTC device.....	123

**Information Technology**

<b>Repetskii O.V., Nguyen Van Man'</b> Verification of the developed mathematical models and the created software on test models of plates and bladed disks of axial turbomachines .....	134
<b>Krakovskii Yu.M., Kramynina G.N.</b> Generalized forecasting of wagon turnover using a complex model that takes into account statistical and expert information.....	145
<b>Elpashev S.Yu.</b> Analysis of the main performance indicators of the scheme power supply of distribution electric networks of the Chita city .....	154



**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: [stsam.irkgups.ru](http://stsam.irkgups.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@irkgups.ru](mailto:stsam@irkgups.ru)

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ**

**TRANSPORT SYSTEMS**

## Моделирование режимов однофазных замыканий в системах электроснабжения нетяговых потребителей

А.В. Крюков<sup>1,2</sup>, И.С. Овечкин<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

✉iliaov2015@mail.ru

### Резюме

Ежегодно из-за аварий на сетях, обеспечивающих электропитание сигнальных точек, возникают задержки в движении нескольких тысяч поездов. Значительная доля от общего числа отказов приходится на однофазные замыкания на землю. Особенность данного вида неисправностей заключается в небольших токах, что серьезно усложняет обнаружение мест их возникновения. Поврежденные линии электрических передач не отключаются релейной защитой, при этом в длительных режимах однофазных замыканий на землю может происходить разрушение структуры железобетонных опор при протекании через них тока однофазных замыканий на землю. Кроме этого, увеличение напряжения здоровых фаз относительно земли до линейных значений может приводить к пробое изоляции и возникновению двухфазных замыканий. Режимы однофазных замыканий на землю в сетях общего назначения подробно рассмотрены во многих отечественных и зарубежных публикациях. Однако задача определения таких режимов в технологических линиях электрических передач на железнодорожном транспорте, находящихся в зонах повышенных электромагнитных влияний тяговых сетей, остается актуальной. Для ее решения могут эффективно использоваться методы моделирования режимов систем электроснабжения железнодорожного транспорта, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения и реализованные в программном комплексе Fazonord. В статье описана модель системы объектов железнодорожного транспорта, включающая воздушную линию продольного электроснабжения, смонтированную на опорах контактной сети, представлены результаты определения режимов однофазных замыканий на землю, сделаны выводы о влиянии тяговой сети на токи замыканий. Цифровые модели, описанные в работе, позволяют получить полную информацию о режимах однофазных замыканий на землю на основной частоте и на частотах высших гармоник. Данные модели могут найти практическое применение при решении задач настройки устройств, обеспечивающих идентификацию однофазных замыканий на землю, а также для разработки методов локализации мест их возникновения в сетях, подверженных электромагнитным влияниям.

### Ключевые слова

однофазные замыкания на землю, системы электроснабжения объектов железнодорожного транспорта, линии электрических передач, программный вычислительный комплекс Fazonord, моделирование

### Для цитирования

Крюков А.В. Моделирование режимов однофазных замыканий в системах электроснабжения нетяговых потребителей / А.В. Крюков, И.С. Овечкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 10–23. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).10-23.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 13.03.2024 г.; поступила после рецензирования: 20.03.2024 г.; принята к публикации: 21.03.2024 г.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

## Modeling of single-phase fault modes in power supply systems of non-traction consumers

A.V. Kryukov<sup>1,2</sup>, I.S. Ovechkin<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

✉iliaov2015@mail.ru

### Abstract

Every year, due to accidents in the networks providing power supply to signal points, delays occur in the movement of several thousand trains. A significant proportion of the total number of failures are single-phase ground faults. The peculiarity of this

type of malfunction consists in small currents, which greatly complicates the detection of their occurrence. Damaged electric transmission lines are not switched off by relay protection, while in long-term modes of single-phase ground faults, the structure of reinforced concrete supports may be destroyed when a single-phase ground fault current flows through them. In addition, an increase in the voltage of healthy phases relative to the ground to linear values may result in insulation breakdown and the occurrence of two-phase short circuits. The modes of single-phase ground faults in general-purpose networks are considered in detail in a large number of domestic and foreign publications. However, the task of determining such modes in technological lines of electric transmissions on railway transport located in areas of increased electromagnetic influences of traction networks remains unresolved in full. To solve it, it is possible to effectively use methods of modeling modes of railway power supply systems developed at the Irkutsk State Transport University and implemented in the Fazonord software package. The article describes a model of a system of railway transport facilities, including an overhead line of longitudinal power supply mounted on supports of a contact network. The results of determining the modes of single-phase ground faults are presented. Conclusions are drawn about the influence of the power grid on short-circuit currents. The digital models described in the article allow to obtain complete information about the modes of single-phase ground faults at the fundamental frequency and at higher harmonic frequencies and can find practical application in solving problems of configuring devices that identify single-phase ground faults, as well as for developing methods for localizing their occurrence in networks subject to electromagnetic influences.

### Keywords

single-phase ground faults, power supply systems for railway transport facilities, electric transmission lines, Fazonord software package, modeling

### For citation

Kryukov A.V., Ovechkin I.S. Modelirovanie rezhimov odnofaznykh замыканий в системах электроснабжения нетяговых потребителей [Modeling of single-phase short circuits in the power supply system of non-traction consumers]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 10–23. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).10-23.

### Article Info

Received: March 13, 2024; Revised: March 20, 2024; Accepted: March 21, 2024.

### Acknowledgement

The work was carried out within the framework of the state task «Conducting applied scientific research» on the topic «Development of methods, algorithms and software for modeling modes of traction power supply systems of direct current railways».

### Введение

Среди нетяговых потребителей железных дорог наибольшее внимание уделяется устройствам сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), обеспечивающим безопасность движения поездов. Ежегодно из-за отказов в сетях электропитания сигнальных точек возникают задержки в движении нескольких тысяч поездов [1]. Значительная доля от общего числа неисправностей приходится на однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Особенность данного вида неисправностей заключается в сравнительно небольших токах, что очень затрудняет обнаружение мест их возникновения. Поврежденные линии электрических передач (ЛЭП) не отключаются релейной защитой, при этом в длительных режимах ОЗЗ может происходить разрушение структуры железобетонных опор при протекании через них тока ОЗЗ. Кроме этого, увеличение напряжения здоровых фаз относительно земли до линейных значений может приводить к пробое изоляции и возникновению двухфазных замыканий.

Режимы ОЗЗ в сетях общего назначения подробно рассмотрены в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях. Так, например, в [2] предложена методика оценки распределения токов ОЗЗ при помощи программного комплекса RastrWin. Алгоритм обнаружения ОЗЗ на основе критерия фазовой асимметрии описан в [3]. Метод определения токов ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью представлен в [4, 5]. Результаты разработки алгоритма автоматической настройки компенсации емкостных токов ЛЭП приведены в [6]. Задача обнаружения ОЗЗ с анализом параметров в системах электроснабжения (СЭС) с непрямым заземлением решена в [7]. Метод идентификации слабых повреждений в распределительных сетях с высоким импедансом, основанный на использовании изменений асимметрии, описан в [8]. Дополнительный критерий выбора неисправного фидера при ОЗЗ в распределительных сетях предложен в [9]. Обзор методов поиска неисправностей СЭС среднего напряжения, использующих глубокое обучение, выполнен в [10]. Способы обнаруже-

ния ОЗЗ в распределенных сетях на основе искусственных нейронных сетей описаны в [11, 12]. Алгоритм локализации ОЗЗ в СЭС с резонансным заземлением на основе концепции объединения функций предложен в [13]. Способ поиска ОЗЗ с использованием сверточной нейронной сети и декомпозиции задач рассмотрен в [14]. Технология обнаружения ОЗЗ, основанная на применении кластеризации признаков и разложения по сингулярным значениям в сетях с резонансным заземлением, описана в [15]. Метод выделения неисправного фидера, базирующийся на анализе установившихся и переходных параметров и обратном преобразовании Фурье, представлен в [16]. Способ определения поврежденного фидера с ОЗЗ, использующий быстрое преобразование Фурье и коэффициент корреляции Пирсона, рассмотрен в [17]. Алгоритм диагностики неисправностей распределительной ЛЭП на основе энтропии энергии вейвлета предложен в [18]. Способ обнаружения переходных процессов, вызванных повреждениями, на основе анализа энергии вейвлет-коэффициента в реальном времени рассмотрен в [19].

Цель представленных в статье исследований заключается в разработке методов и цифровых моделей для определения режимов однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения железнодорожного транспорта (ЖДТ).

Анализ указанных публикаций [2–19] позволяет сделать вывод, что в них рассмотрены важные вопросы, связанные с определением режимов ОЗЗ и поиском мест их возникновения в сетях общего назначения. Однако задача моделирования ОЗЗ в сетях, питающих объекты ЖДТ, остается не решенной. Она отличается повышенной сложностью из-за следующих факторов: разнородная структура СЭС ЖДТ, включающих трехфазные и однофазные сегменты; перемещение электровозов в пространстве; значительные электромагнитные влияния тяговых сетей (ТС) на смежные ЛЭП и др. [20, 21].

Далее представлены результаты моделирования ОЗЗ в СЭС ЖДТ и выполнен анализ изменений ее параметров при движении поездов.

### Результаты моделирования

Моделирование осуществлялось в программном комплексе Fazonord (версия 5.3.4.1–

2024 г. для СЭС ЖДТ) (рис. 1). Фрагмент внешнего вида расчетной модели приведен на рис. 2, а. В ней представлены следующие элементы сети: питающие ЛЭП 110 кВ; тяговые трансформаторы ТДТНЖ-40000-110/27,5; участок ТС протяженностью 50 км, включающий контактные подвески, рельсовые нити, линии 6 и 10 кВ. Тяговые нагрузки создавались движением двух поездов массой 3 192 т в нечетном направлении и двух составов массой 4 192 т – в четном (рис. 2, б). Зависимости потребляемых поездами токов от пикетов показаны на рис. 2, в и г. Поперечное сечение ТС приведено на рис. 3. Результаты моделирования представлены на рис. 4–8. Результаты определения исходного, доаварийного режима проиллюстрированы на рис. 4, на котором показаны графики зависимостей от времени  $t$  следующих параметров: напряжений основной частоты  $U_1 = U_1(t)$ ; коэффициентов высших гармоник (ВГ)  $k_U = k_U(t)$  и эффективных напряжений с учетом ВГ  $U_\Sigma = U_\Sigma(t)$ . Напряжения фиксировались в точке, отвечающей расстоянию 10 км от подстанции ТП 1.

Полученные результаты показывают, что из-за влияния ТС наблюдаются колебания фазных напряжений основной частоты. При этом по фазе А коэффициент вариации достигает 7 %, а размах колебаний равен 1,7 кВ. Имеет место существенная несимметрия фазных напряжений (рис. 4, а), которая приводит к различию токов ОЗЗ разных фаз. Электровозы создают значительные уровни несинусоидальности токов и напряжений в ТС. За счет этого имеют место сильные гармонические искажения напряжений воздушных линий СЦБ: максимум коэффициента гармоник по фазе А равен 92 %, а по фазам В и С – 45 и 77 % соответственно.

Результаты моделирования режимов ОЗЗ фазы В для точки, расположенной на расстоянии 10 км от подстанции ТП 1, представлены на рис. 5. Напряжения неповрежденных фаз возрастают до линейных значений. Напряжение фазы В для точки ОЗЗ снижается до нуля. Максимумы коэффициентов  $k_{2U}$  фаз А и С уменьшаются до 41 и 49 % соответственно. Характер изменения токов ОЗЗ показан на рис. 6. На рис. 7 приведены формы кривых напряжений неповрежденных фаз, а также тока ОЗЗ. Коэффициент гармоник тока ОЗЗ в некоторые моменты времени достигает сотен процентов, что приводит к значительным отличиям его формы кривой от синусоиды (рис. 7).

В спектральном составе тока ОЗЗ (рис. 8) наблюдается значительный вклад таких высших гармоник, как 3, 5, 7, 13 и 15. Коэффици-

ент данных ВГ лежит в диапазоне 30–37 %, для остальных ВГ он находится в пределах 2–10 %.

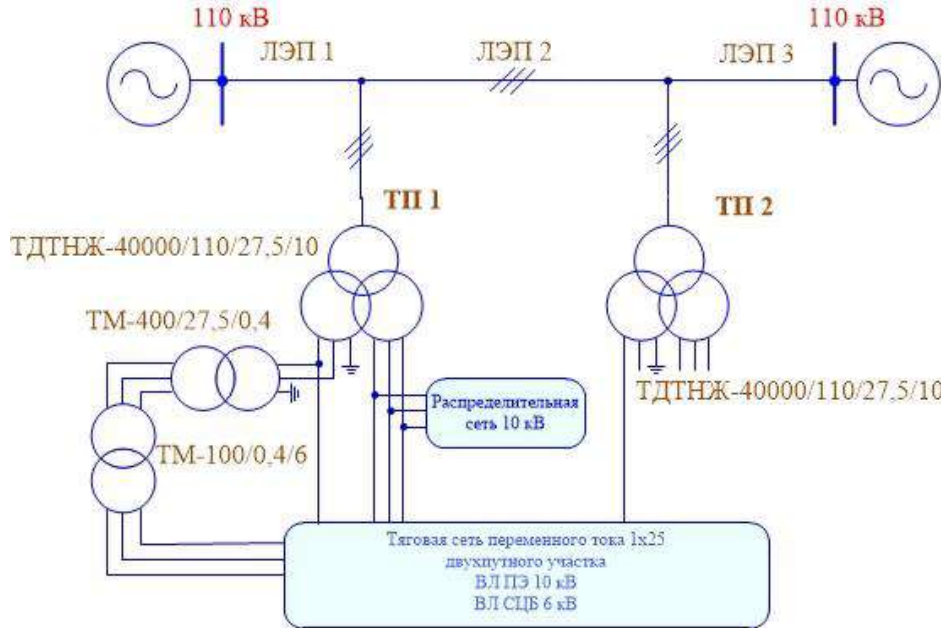


Рис. 1. Схема системы электроснабжения железнодорожного транспорта  
 Fig. 1. Diagram of the railway transport power supply system

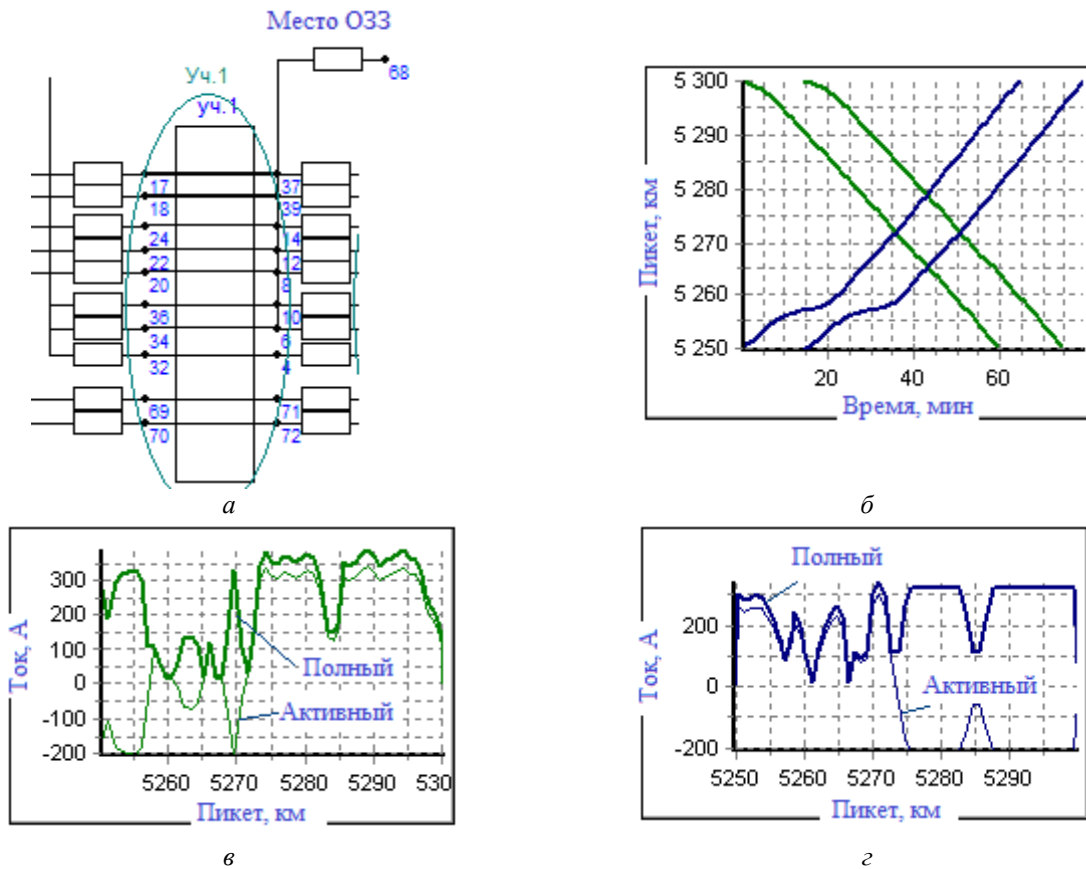


Рис. 2. Фрагмент расчетной схемы (а), график движения (б) и токовые профили поездов (в, г)  
 Fig. 2. Fragment of the calculation diagram (a), traffic graph (b) and current profiles of trains (c, d)



Рис. 3. Расположение токоведущих частей  
Fig. 3. Location of live parts

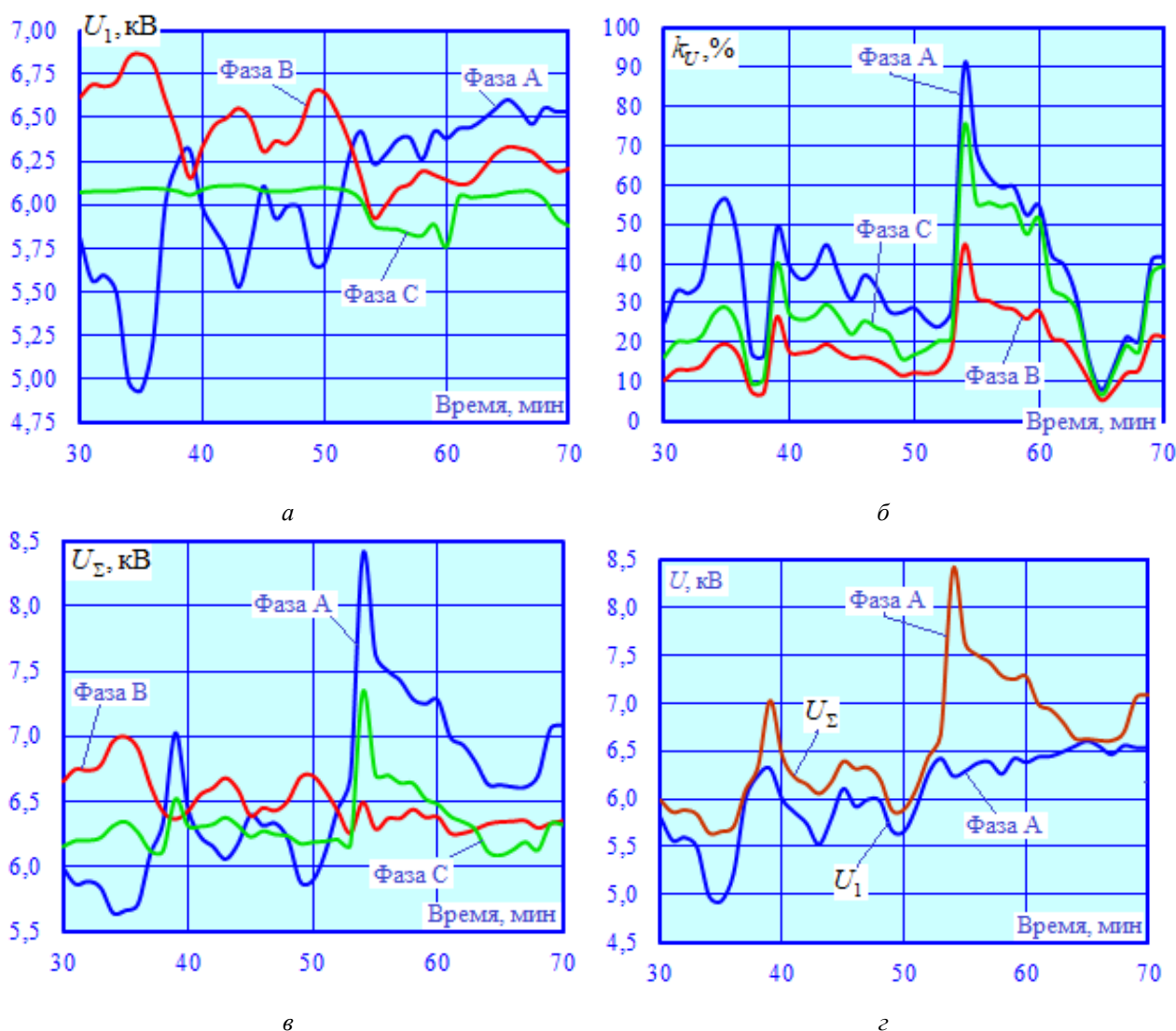
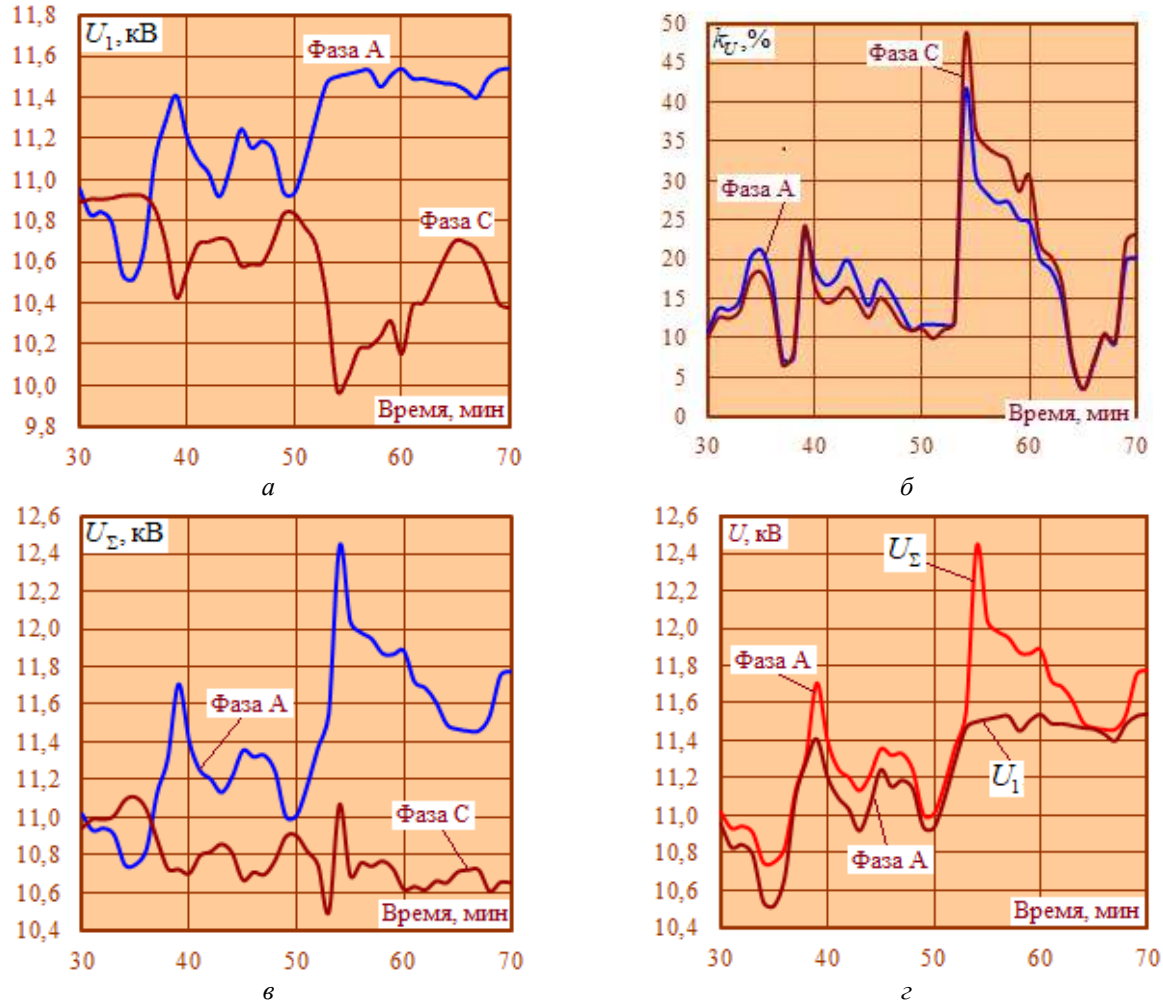


Рис. 4. Исходный (доаварийный) режим:

*a* – напряжения основной частоты; *б* – коэффициенты гармоник;  
*в* – эффективные напряжения с учетом высших гармоник; *г* – сравнение  $U_1$  и  $U_\Sigma$

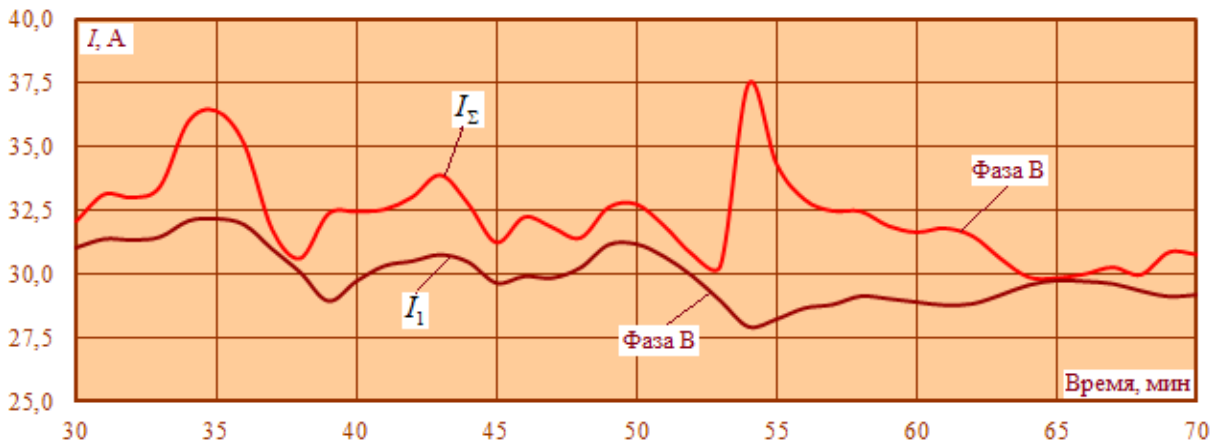
Fig. 4. Initial (pre-emergency) mode:

*a* – fundamental frequency voltage; *b* – harmonic coefficients;  
*c* – effective voltages taking into account higher harmonics; *d* – comparison of  $U_1$  and  $U_\Sigma$



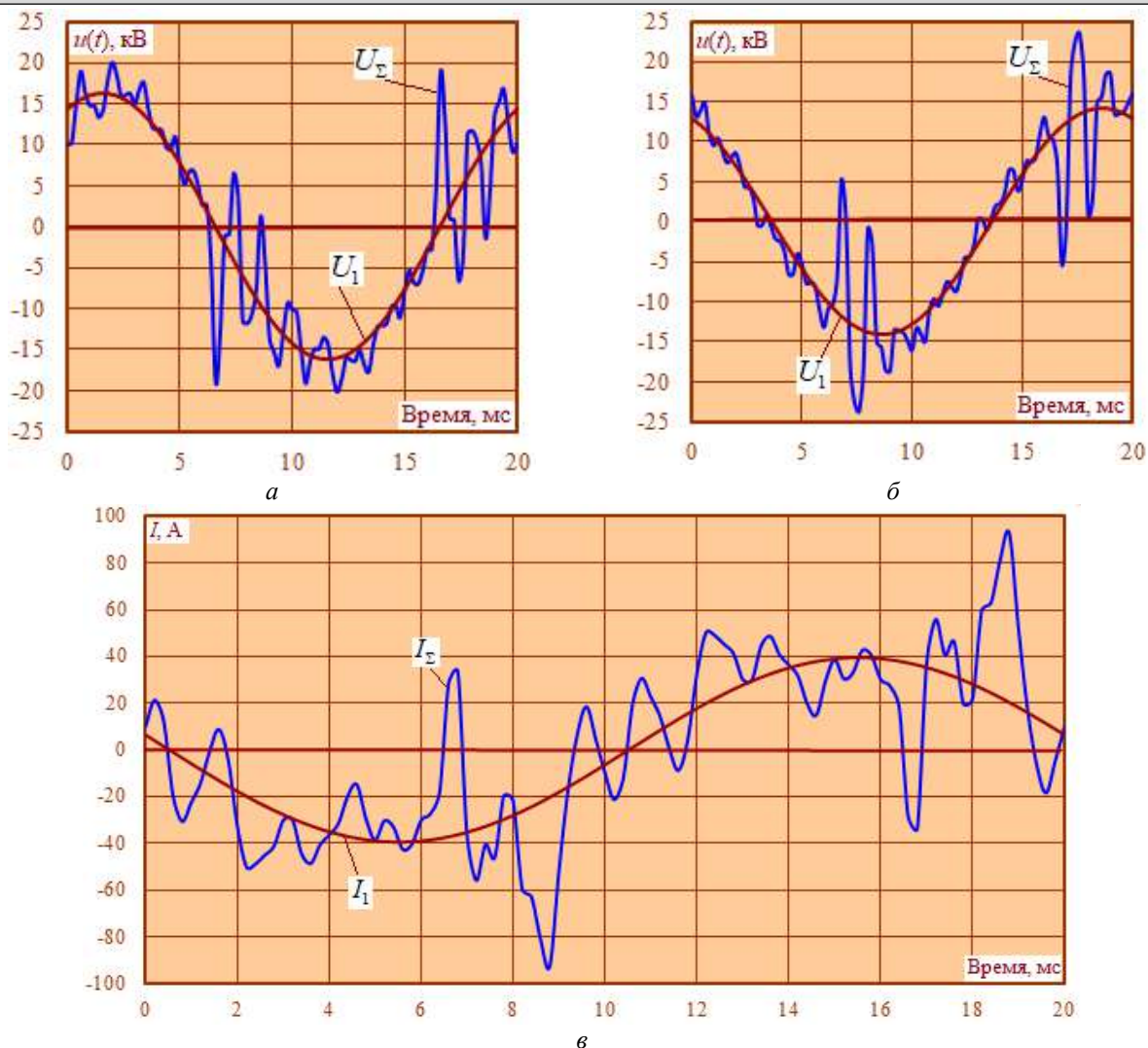
**Рис. 5.** Режим однофазных замыканий на землю:  
 а – напряжения основной частоты; б – коэффициенты гармоник;  
 в – эффективные напряжения с учетом высших гармоник; г – сравнение  $U_1$  и  $U_\Sigma$

**Fig. 5.** Single-phase earth fault mode:  
 a – fundamental frequency voltage; b – harmonic coefficients;  
 c – effective voltages taking into account higher harmonics; d – comparison of  $U_1$  and  $U_\Sigma$



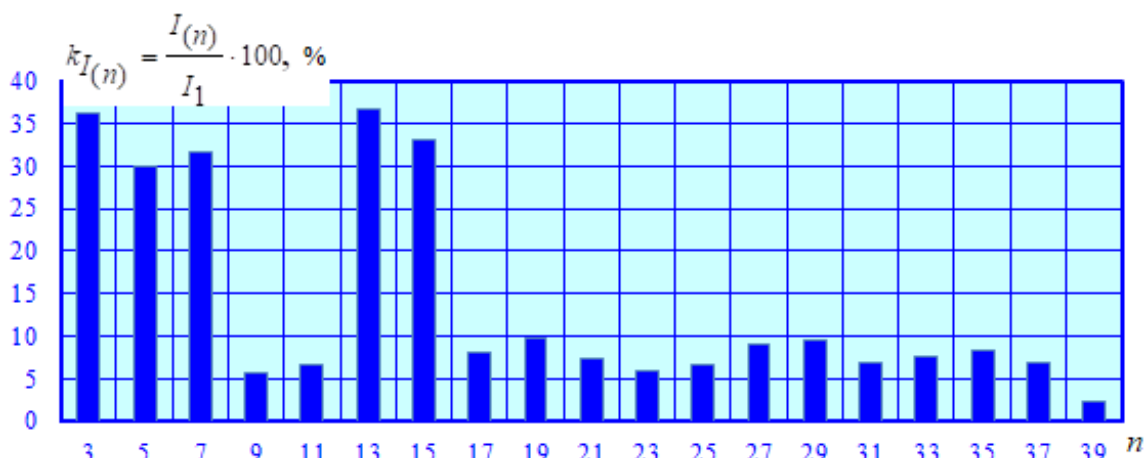
**Рис. 6.** Токи однофазных замыканий на землю  
**Fig. 6.** Single-phase ground fault currents





**Рис. 7.** Формы кривых напряжений неповрежденных фаз *A* (*a*) и *C* (*б*) в месте замыкания, токов однофазных замыканий на землю (*в*) на 54-й минуте моделирования

**Fig. 7.** Shapes of voltage curves of undamaged phases *A* (*a*) and *C* (*b*) at the fault point, single-phase ground fault currents (*in*) at the 54th minute of simulation



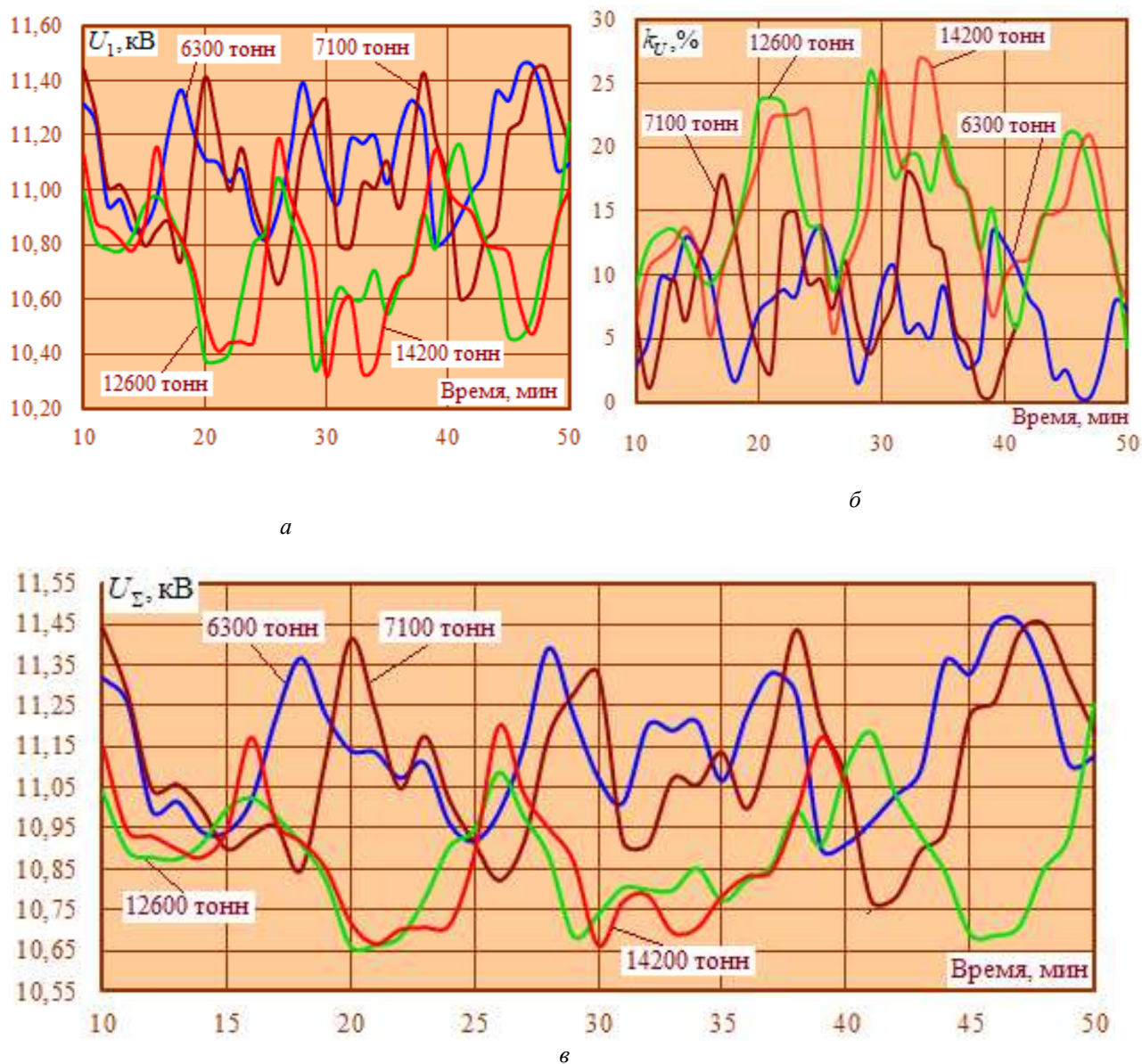
**Рис. 8.** Спектральный состав тока однофазных замыканий на землю в месте повреждения

**Fig. 8.** Spectral composition of single-phase ground fault current at the damage location

### Влияние массы поезда на режим однофазных замыканий на землю

Для расчетной схемы (см. рис. 1) проведено моделирование движения четырех поездов при изменении массы от 6 300 до 14 200 т. Интервал попутного следования принимался рав-

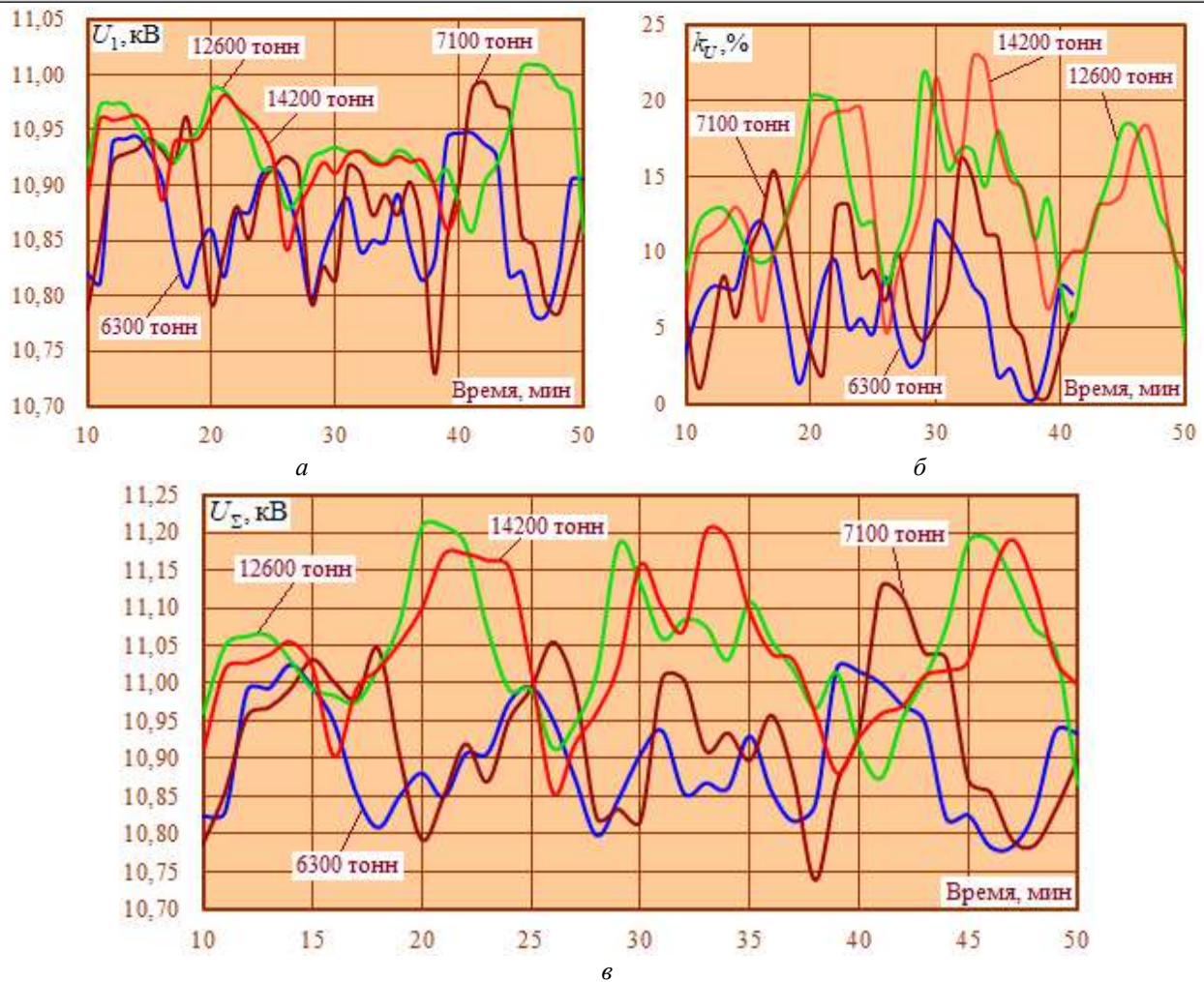
ным 10 мин. Рассматривалось ОЗЗ фазы  $B$  для точки воздушной линии электроснабжения, расположенной на расстоянии 10 км от ТП1. Результаты расчетов приведены на рис. 9–12.



**Рис. 9.** Режим однофазных замыканий на землю: сравнение напряжений основной частоты (*a*), коэффициентов гармоник (*б*) и эффективных напряжений с учетом высших гармоник для фазы  $A$  при разных массах (*в*)

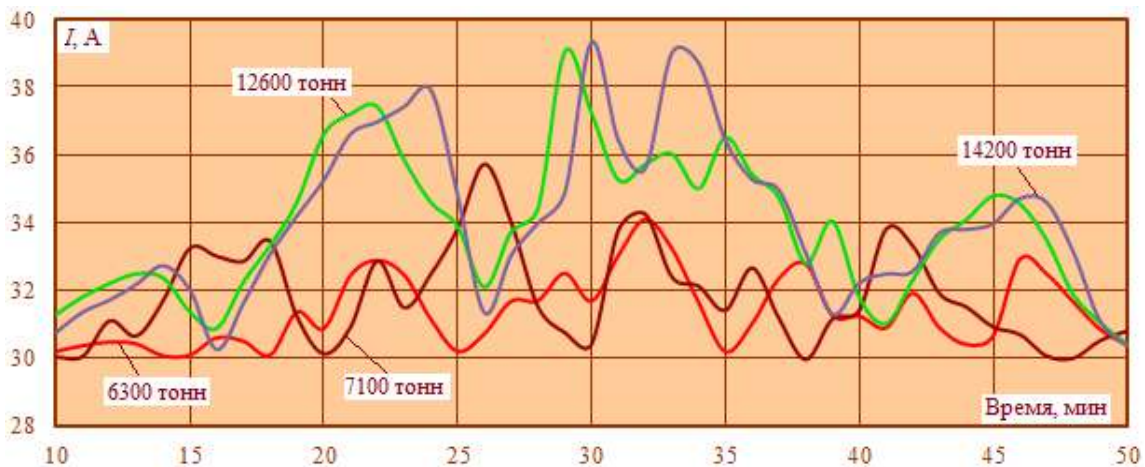
**Fig. 9.** Single-phase earth fault mode: comparison of fundamental frequency voltages (*a*), harmonic coefficients (*b*)

and effective voltages taking into account higher harmonics for phase  $A$  at different masses (*c*)



**Рис. 10.** Режим однофазных замыканий на землю: сравнение напряжений основной частоты (*а*), коэффициентов гармоник (*б*) и эффективных напряжений с учетом высших гармоник для фазы *C* при разных массах (*в*)

**Fig. 10.** Single-phase earth fault mode: comparison of fundamental frequency voltages (*a*), harmonic coefficients (*b*) and effective voltages taking into account higher harmonics for phase *C* at different masses (*c*)



**Рис. 11.** Сравнение эффективных токов однофазных замыканий на землю при разных массах

**Fig. 11.** Comparison of effective currents of single-phase earth faults at different masses

С увеличением массы  $M$  максимумы коэффициентов  $k_U$  повышался с 14 до 27 % для фазы  $B$  и с 16 до 23 % – для  $C$ . Характер изменения токов ОЗЗ показан на рис. 11. С повышением  $M$  эффективный ток увеличивается с 34 до 39 А. На рис. 12. представлен спектральный состав тока ОЗЗ в месте повреждения.

Наблюдается значительный вклад таких ВГ, как 3, 5, 7, 13 и 15, величина  $k_{U(n)}$  для которых лежит в диапазоне 15–38 %. С ростом  $M$  амплитуда

всех ВГ также увеличивается. Причем наибольшее повышение (в 1,8–2 раза) характерно для гармоник с номерами 3, 5, 7, 13 и 15.

### Влияние интервала движения на режим однофазных замыканий на землю

Проведен анализ режима ОЗЗ фазы  $B$  на 10 км от ТП 1 при изменении интервала движения  $t_D$  поездов с 8 до 20 мин. Результаты расчетов приведены на рис. 13–16.

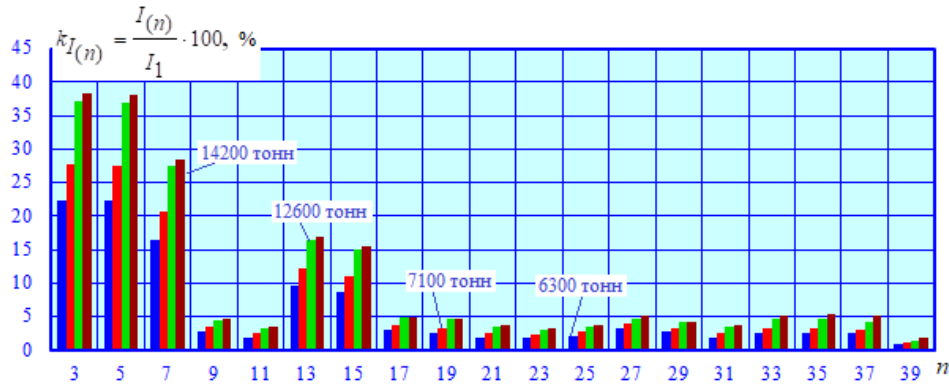


Рис. 12. Спектральный состав тока однофазных замыканий на землю в месте повреждения  
Fig. 12. Spectral composition of single-phase ground fault current at the fault location

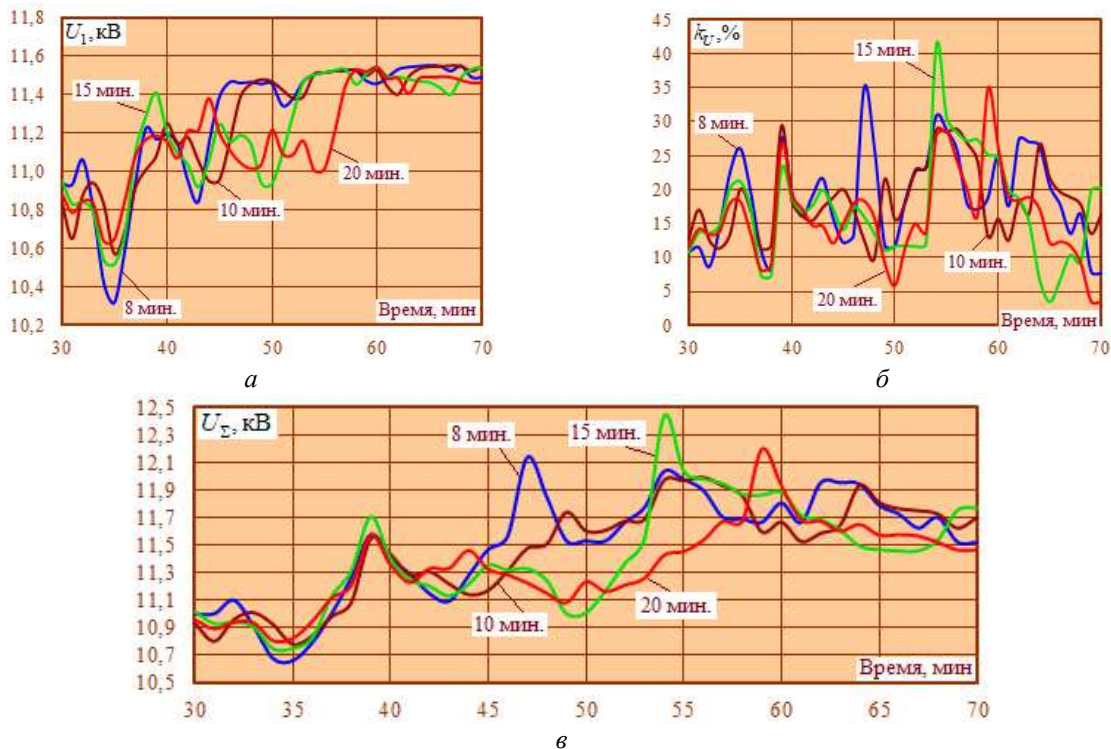
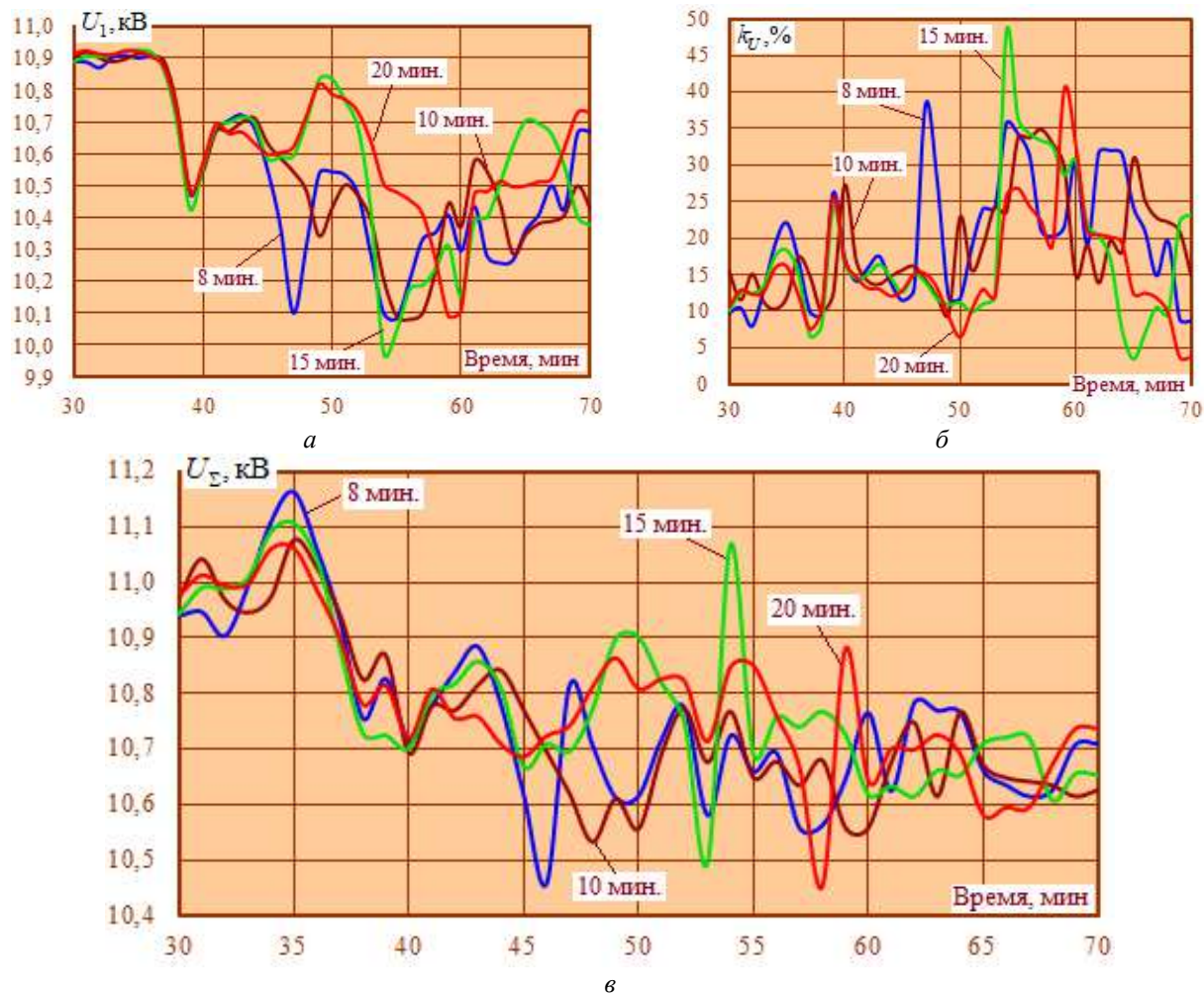


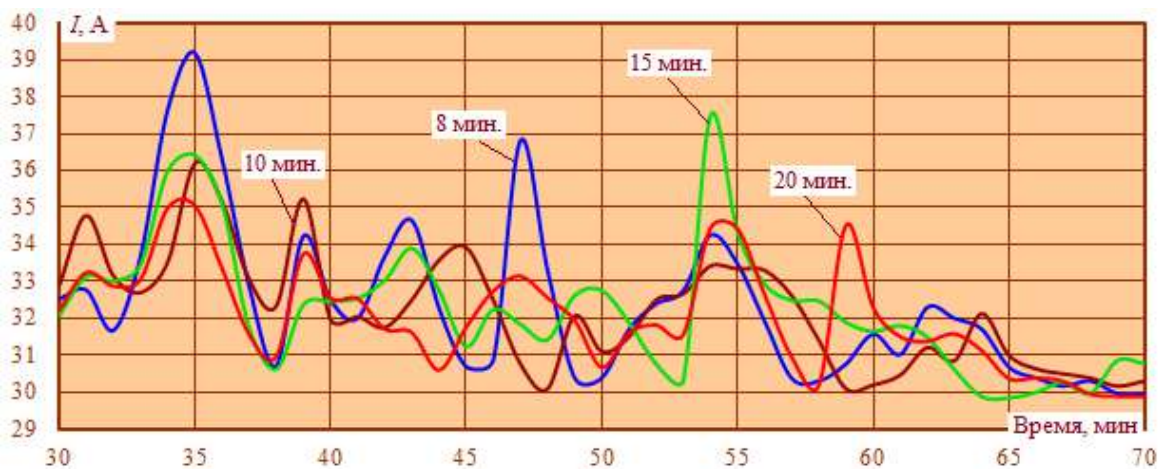
Рис. 13. Режим однофазных замыканий на землю:  
сравнение напряжений основной частоты (а), коэффициентов гармоник (б)  
и эффективных напряжений с учетом высших гармоник (в) для фазы А при разных интервалах

Fig. 13. Single-phase earth fault mode:  
comparison of fundamental frequency voltages (a), harmonic coefficients (b)  
and effective voltages taking into account higher harmonics (c) for phase A at different intervals



**Рис. 14.** Режим однофазных замыканий на землю: сравнение напряжений основной частоты (а), коэффициентов гармоник (б) и эффективных напряжений с учетом высших гармоник (в) для фазы С при разных интервалах

**Fig. 14.** Single-phase earth fault mode: comparison of fundamental frequency voltages (a), harmonic coefficients (b) and effective voltages taking into account higher harmonics (c) for phase C at different intervals



**Рис. 15.** Сравнение эффективных токов однофазных замыканий на землю при разных интервалах  
**Fig. 15.** Comparison of effective currents of single-phase earth faults at different intervals

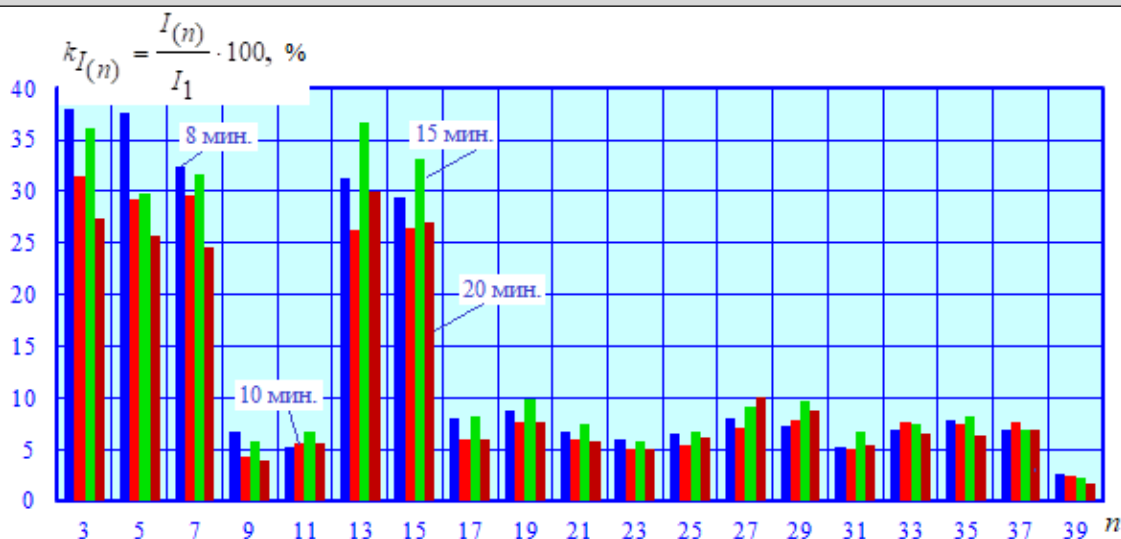


Рис. 16. Спектральный состав тока однофазных замыканий на землю в месте повреждения  
 Fig. 16. Spectral composition of single-phase ground fault current at the fault location

Результаты моделирования при изменении интервала движения  $t_D$  показывают, что максимальное значение эффективного тока  $I_\Sigma$  (39,2 А) наблюдается при  $t_D = 8$  мин. С увеличением  $t_D$  до 10 мин  $I_\Sigma$  уменьшается до 36,3 А. Однако при  $t_D = 15$  мин  $I_\Sigma$  возрастает до 37,6 А. При  $t_D = 20$  мин максимальное значение  $I_\Sigma$  равно 35,2 А.

В спектральном составе тока ОЗЗ (см. рис. 16) наблюдается значительный вклад таких ВГ, как 3, 5, 7, 13 и 15. Величина  $k_{U(n)}$  для данных ВГ находится в пределах 24–38 %. Для ВГ с номерами 3, 5, 7, 9 и 39  $k_{U(n)}$  при  $t_D = 8$  мин превышает все остальные значения.

### Заключение

Цифровые модели, представленные в статье, позволяют получить полную информацию о режимах ОЗЗ на основной частоте и на частотах ВГ и могут найти практическое применение при решении задач настройки устройств, обеспечивающих идентификацию ОЗЗ, а также при разработке методов локализации мест ОЗЗ на ЛЭП, подверженных электромагнитным влияниям тяговых сетей.

### Список литературы

1. Аржанников Б.А., Сергеев Б.С., Набойченко И.О. Системы электроснабжения устройств СЦБ. Екатеринбург : УрГУПС, 2009. 99 с.
2. Оценка распределения токов однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью при помощи программного комплекса RASTRWIN / Е.В. Перьков, А.А. Цагикян, С.С. Ястребов и др. // Электроэнергетика глазами молодежи-2020 : Материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Ставрополь, 2020. Т. 1. С. 287–290.
3. Phase asymmetry: a new parameter for detecting single-phase ground faults in compensated MV networks / K.J. Sagastabeitia, I. Zamora, A.J. Mazon et al. // IEEE Trans Power Delivery. 2011. Vol. 26, Iss. 4. P. 2251–2258. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2141155.
4. Разработка методов определения токов однофазного замыкания на землю и утечки в несимметричной сети с изолированной нейтралью / Б.Б. Утегулов, А.Б. Утегулов, А.Б. Уахитова и др. // Наука и техника Казахстана. №1. 2010. С. 18–20.
5. Утегулов Б.Б., Шинтемиров А.М. Математическое моделирование устройства автоматического определения тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6–10 кВ // Наука и техника Казахстана. 2003. №2. С. 174–181.
6. Осипов Д.С., Долингер С.Ю., Сафонов Д.Г. Разработка алгоритма автоматической настройки компенсации емкостных токов на основе существующих методов // Омский научный вестник. № 4 (148). 2016. С. 79–84.
7. Single-phase-to-ground fault detection with distributed parameters analysis in non-direct grounded systems / L. Baowen, M. Hongzhong, X. Honghua et al. // CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2019. Vol. 5. Iss. 1. P. 139–147. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2016.00740.
8. Low-current fault detection in high impedance grounded distribution networks, using residual variations of asymmetries / K.J. Sagastabeitia, I. Zamora, A.J. Mazon et al. // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. Vol. 6. Iss. 12. P. 1252–1261. DOI: 10.1049/iet-gtd.2012.0195.

9. Pandakov K, Høidalen H.K., Trætteberg S. An additional criterion for faulty feeder selection during ground faults in compensated distribution networks // *IEEE Trans on Power Delivery*. 2018. Vol. 33. Iss. 6. P. 2930–2937. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2843528.
10. Review of Medium-voltage switchgear fault detection in a condition-based monitoring system by using deep learning / Y.A.M. Alsumaidae, C.T. Yaw, S.P. Koh et al. // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 18. DOI: 10.3390/en15186762.
11. Ahmadi A., Aghajari E., Zangeneh M. Earth fault detection in distributed power systems on the basis of artificial neural networks approach // *Journal of Engg Research on Line First Article*. 2021. DOI: 10.36909/jer.13627.
12. Deep-learning-based ground fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems / M.-F. Guo, X.-D. Zeng, D.-Yu. Chen et al. // *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18. Iss. 3. P. 1291–1300. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2776238.
13. Single line-to-ground faulted line detection of distribution systems with resonant grounding based on feature fusion framework / D. Ying, L. Yadong, S. Qingzhu et al. // *IEEE Trans Power Delivery*. 2019. Vol. 34. Iss. 4. P. 1766–1775. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2922480.
14. Detection of single line-to-ground fault using convolutional neural network and task decomposition framework in distribution systems / D. Ying, S. Qingzhu, L. Yadong et al. // *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. Perth, 2018. DOI: 10.1109/CMD.2018.8535600.
15. M.-F. Guo, N.-C. Yang. Features-clustering-based ground fault detection using singular value decomposition and fuzzy c-means in resonant grounding distribution systems // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2017. Vol. 93. P. 97–108. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.05.014>.
16. Fault feeder detection method utilized steady state and transient components based on FFT backstepping in distribution networks / W. Xiaowei, W. Xiangxiang, Y. De-chang et al. // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 114. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105391.
17. Faulty feeder detection method based on VMD–FFT and Pearson correlation coefficient of non-power frequency component in resonant grounded systems / K. Wei, J. Zhang, Y. He et al. // *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 18. DOI: 10.3390/en13184724.
18. Fault diagnosis algorithm for distribution line based on wavelet singular entropy and wavelet energy entropy / L. Rui, Y. Nan-hua, G. Ming et al. // *2017 IEEE 2nd advanced information technology, electronic and automation control conference (IAEAC)*. Chongqing, 2017. P. 2395–2398. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054451.
19. Costa F.B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014. Vol. 29. Iss. 1. P. 140–153. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2278272.
20. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : ИрГУПС, 2005. 273 с.
21. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск : ИрГУПС, 2011. 160 с.

## References

1. Arzhannikov B.A., Sergeev B.S., Naboichenko I.O. Sistemy elektrosnabzheniya ustroystv STsB [Power supply systems for signaling devices]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2009. 99 p.
2. Per'kov E.V., Tsagikyan A.A., Yastrebov S.S., Efanov E.V. Otsenka raspredeleniya tokov odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu pri pomoshchi programmnoho kompleksa RASTRWIN [Assessment of the distribution of single-phase ground fault currents in networks with an isolated neutral using the RASTRWIN software package]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi-2020»* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference «Electric power industry through the eyes of youth-2020»]. Stavropol', 2020, vol. 1, pp. 287–290.
3. Sagastabeitia K.J, Zamora I., Mazon A.J., Aginako Z., Buigues G. Phase asymmetry: a new parameter for detecting single-phase ground faults in compensated MV networks. *IEEE Trans Power Delivery*, 2011, vol. 26, iss. 4, pp. 2251–2258. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2141155.
4. Utegulov B.B., Utegulov A.B., Uakhitova A.B., Begentaev B.M. Razrabotka metodov opredeleniya tokov odnofaznogo zamykaniya na zemlyu i utechki v nesimmetrichnoi seti s izolirovannoi neutral'yu [Development of methods for determining single-phase ground fault currents and leaks in an asymmetrical network with an isolated neutral]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and technology of Kazakhstan], 2010, no. 1, pp. 18–20.
5. Utegulov B.B., Shintemirov A.M. Matematicheskoe modelirovanie ustroystva avtomaticheskogo opredeleniya toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV [Mathematical modeling of a device for automatic detection of single-phase ground fault current in 6-10 kV electrical networks]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and Technology of Kazakhstan], 2003, no. 2, pp. 174–181.
6. Osipov D.S., Dolinger S.Yu., Safonov D.G. Razrabotka algoritma avtomaticheskoi nastroiки kompensatsii emkostnykh tokov na osnove sushchestvuyushchikh metodov [Development of an algorithm for automatic adjustment of capacitive current compensation based on existing methods]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2016, no. 4 (148), pp. 79–84.
7. Baowen L., Hongzhong M., Honghua X., Ping J. Single-phase-to-ground fault detection with distributed parameters analysis in non-direct grounded systems. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, vol. 5, iss. 1, pp. 139–147. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2016.00740.
8. Sagastabeitia K.J, Zamora I., Mazon A.J., Aginako Z., Buigues G. Low-current fault detection in high impedance grounded distribution networks, using residual variations of asymmetries. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2012, vol. 6, iss. 12, pp. 1252–1261. DOI: 10.1049/iet-gtd.2012.0195.

9. Pandakov K, Høidalen H.K., Trætteberg S. An additional criterion for faulty feeder selection during ground faults in compensated distribution networks. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2018, vol. 33, iss. 6, pp. 2930–2937. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2843528.
10. Alsumaidae Y.A.M., Yaw C.T., Koh S.P., Tiong S.K., Chen C.P., Kharudin A. Review of Medium-voltage switchgear fault detection in a condition-based monitoring system by using deep learning. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 18. DOI: 10.3390/en15186762.
11. Ahmadi A., Aghajari E., Zangeneh M. Earth fault detection in distributed power systems on the basis of artificial neural networks approach. *Journal of Engg Research on Line First Article*, 2021. DOI: 10.36909/jer.13627.
12. Guo M.-F., Zeng X.-D., Chen D.-Yu., Yang N.-C. Deep-learning-based ground fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, iss. 3, pp. 1291–1300. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2776238.
13. Ying D., Yadong L., Qingzhu S., Lingen L., Jindun D., Gehao S. Single line-to-ground faulted line detection of distribution systems with resonant grounding based on feature fusion framework. *IEEE Trans Power Delivery*, 2019, vol. 34, iss. 4, pp. 1766–1775. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2922480.
14. Ying D., Qingzhu S., Yadong L., Gehao S., Xiuchen J. Detection of single line-to-ground fault using convolutional neural network and task decomposition framework in distribution systems. *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. Perth, 2018. DOI: 10.1109/CMD.2018.8535600.
15. M.-F. Guo, N.-C. Yang. Features-clustering-based ground fault detection using singular value decomposition and fuzzy c-means in resonant grounding distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, vol. 93, pp. 97–108. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.05.014>.
16. Xiaowei W., Xiangxiang W., De-chang Y., Guobing S., Jie G., Yanfang W., Zhihui Z., Wang P. Fault feeder detection method utilizes steady state and transient components based on FFT backstepping in distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 114. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105391.
17. Wei K, Zhang J, He Y, Yao G, Zhang Y. Faulty feeder detection method based on VMD–FFT and Pearson correlation coefficient of non-power frequency component in resonant grounded systems. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 18. DOI: 10.3390/en13184724.
18. Rui L., Nan-hua Y., Ming G., Yi-dan S., Bin-bin Zh., Bing-kun X., Chun-xiang L. Fault diagnosis algorithm for distribution line based on wavelet singular entropy and wavelet energy entropy. *2017 IEEE 2nd advanced information technology, electronic and automation control conference (IAEAC)*. Chongqing, 2017, pp. 2395–2398. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054451.
19. Costa F.B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, vol. 29, iss. 1, pp. 140–153. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2278272.
20. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complicated asymmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2005. 273 p.
21. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Methods for joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011. 160 p.

### Информация об авторах

**Крюков Андрей Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: and\_kryukov@mail.ru.  
**Овечкин Илья Сергеевич**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: iliaov2015@mail.ru.

### Information about the authors

**Andrei V. Kryukov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University; Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: and\_kryukov@mail.ru.  
**Ilya S. Ovechkin**, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: iliaov2015@mail.ru.



## Анализ прочности и модернизация конструкции области шкворневой балки главной рамы специального подвижного состава

М.М. Савельев<sup>1,4</sup>✉, В.И. Федорова<sup>1,2</sup>, В.В. Жавыркин<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва, Российская Федерация

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

<sup>3</sup>Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup>ООО «Синара Алгоритм», г. Москва, Российская Федерация

✉SavelevMM@internet.ru

### Резюме

Данная статья представляет собой исследование конструкции области шкворневой балки главной рамы специального подвижного состава. В основе работы лежит анализ технических характеристик указанной области с целью выявления потенциальных уязвимостей и проблем, которые могут привести к снижению прочности и безопасности транспортного средства. С помощью современных методов инженерного анализа, включая конечно-элементное моделирование и инженерные расчеты, проведен подробный обзор текущего состояния конструкции и ее поведения под нормативными нагрузками. В соответствии с результатами исследования обозначены потенциальные дефекты и уязвимые места в области шкворневой балки, что является ключевым шагом для разработки эффективных стратегий модернизации. На основе полученных данных выработаны рекомендации по улучшению конструкции, сформулированы предложения относительно применения новых материалов, технологий сборки и методов усиления. Эти предложения направлены на максимизацию прочности области шкворневой балки главной рамы специального подвижного состава, что будет способствовать повышению безопасности и надежности работы транспортного средства. Исследование имеет практическое значение для инженеров, работающих в сфере транспортной инфраструктуры, а также для специалистов, занимающихся техническим обслуживанием и модернизацией транспортных средств. В целом статья вносит значимый вклад в развитие инженерных решений, направленных на интенсификацию безопасности и надежности подвижных составов, что является важным аспектом в современной транспортной индустрии.

### Ключевые слова

шкворневая балка, главная рама, специальный подвижной состав, метод конечных элементов, прочность по допускаемым напряжениям, коэффициент запаса сопротивления усталости, модернизация

### Для цитирования

Савельев М.М. Анализ прочности и модернизация конструкции области шкворневой балки главной рамы специального подвижного состава / М.М. Савельев, В.И. Федорова, В.В. Жавыркин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 24–34. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).24-34.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 20.03.2024 г.; поступила после рецензирования: 27.03.2024 г.; принята к публикации: 01.04.2024 г.

## Stress analysis and design upgrade of the center pivot beam area of the underframe of specialized rolling stock

M.M. Savel'ev<sup>1,4</sup>✉, V.I. Fedorova<sup>1,2</sup>, V.V. Zhavyrkin<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow, the Russian Federation

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

<sup>3</sup>Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

<sup>4</sup>LTD «Sinara Algorithm», Moscow, the Russian Federation

✉SavelevMM@internet.ru

### Abstract

This article presents a research on the design of the center pivot beam area of the underframe of specialized rolling stock. The article is based on an analysis of the technical characteristics of this area in order to identify potential vulnerabilities and problems that could lead to a decrease in the strength and safety of the vehicle. Through the use of modern engineering analysis methods, including finite element modeling and engineering calculations, the research provides a detailed overview of the current state of the structure and its behavior under standard loads. The results of the analysis can identify potential defects and vulnerabilities in the center pivot beam area, which is a key step for developing effective retrofit strategies. Based on the data obtained, recommendations are made for improving the design, including proposals for the use of new materials, assembly technologies and reinforcement methods. These

proposals are aimed at improving the strength and safety of the center pivot beam area of the under frame of specialized rolling stock, which in turn improves the safety and reliability of the vehicle. The study has practical implications for engineers in the field of transport infrastructure, as well as for specialists involved in the maintenance and modernization of vehicles. Overall, this article makes a significant contribution to the development of engineering solutions aimed at improving the safety and reliability of rolling stock, which is an important aspect in the modern transport industry.

### Keywords

center pivot beam, underframe, specialized rolling stock, finite element method, allowable stresses analysis, fatigue resistance factor, modernization

### For citation

Savel'ev M.M., Fedorova V.I., Zhavyrkin V.V. Analiz prochnosti i modernizatsiya konstruktсии oblasti shkvornevoi balki glavnoi ramy special'nogo podvizhnogo sostava [Stress analysis and design upgrade of the center pivot beam area of the underframe of specialized rolling stock]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 24–34. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).24-34.

### Article Info

Received: March 20, 2024; Revised: March 27, 2024; Accepted: April 1, 2024.

### Введение

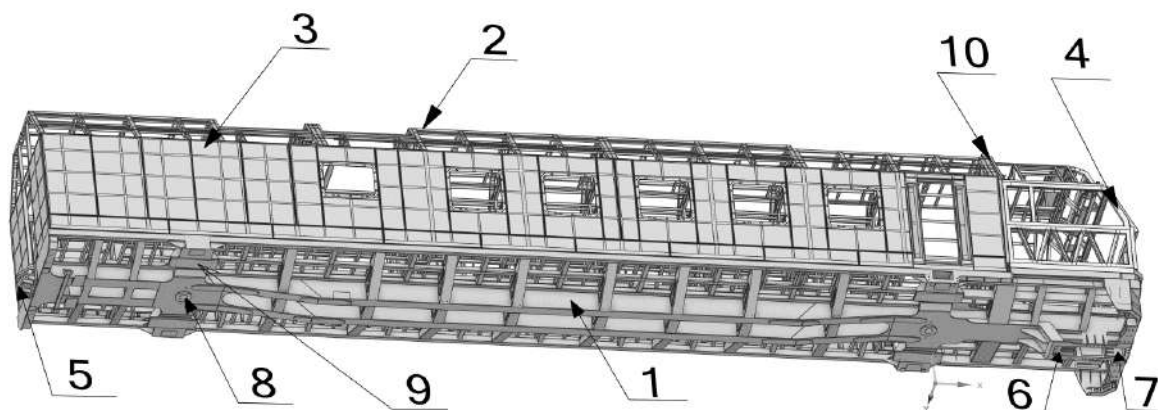
Современные транспортные системы требуют непрерывного развития и совершенствования, особенно в области повышения надежности и безопасности подвижного состава [1, 2]. Одним из ключевых аспектов обеспечения этих критериев является анализ и модернизация конструкций, используемых в главных рамах специального подвижного состава.

Настоящее исследование фокусируется на анализе прочности и последующих улучшениях в области шкворневой балки, являющейся важным элементом главной рамы специального подвижного состава. Шкворневая балка играет решающую роль в обеспечении безопасности и надежности конструкции, особенно при передаче вертикальной статической и динамической

нагрузок от кузова вагона на тележку [3].

Целью данного исследования является проведение прочностного расчета и выполнение анализа текущего состояния области шкворневой балки с целью выявления мест возникновения контактно-усталостных повреждений. На основании полученных результатов ведутся работы, связанные с разработкой рекомендаций по модернизации конструкции с целью повышения ее прочности, надежности и безопасности.

Для достижения поставленной цели в работе используются современные методы инженерного анализа, включая конечно-элементное моделирование и инженерные расчеты [4, 5]. В статье проведен анализ конструкции области



**Рис. 1.** Расчетная модель вагона:

1 – главная рама; 2 – кузов; 3 – обшивка; 4 – кабина; 5 – кронштейн межсекционного шарнира; 6 – задний упор; 7 – передний упор; 8 – втулка шкворня; 9 – проставка под тележку; 10 – соединительная рама между кабиной и кузовом

**Fig. 1.** Calculation model of a wagon:

1 – main frame; 2 – box; 3 – skin; 4 – cabin; 5 – bracket of the inter-sectional hinge; 6 – rear stop; 7 – front stop; 8 – pin bushing; 9 – spacer for the trolley; 10 – connecting frame between the cabin and the body

шкворневой балки главной рамы специального подвижного состава, в том числе материалов, сборки, соединений и технологических особенностей изготовления.

### Подготовка геометрии

Геометрическая модель устаревшей модели головного вагона специального подвижного состава, предназначенного для исправления дефектов верхнего строения железнодорожного пути, переработана в расчетную модель (рис. 1), включающую следующие элементы:

- главная рама (вместе с платформой между кабиной и главной рамой);
- кузов;
- обшивка кузова;
- кабина;
- кронштейн межсекционного шарнира;
- упоры автосцепки;
- втулки шкворней;
- проставки под тележку;
- соединительная рама между кабиной и кузовом.

Проводится тщательная проверка геометрической модели, которая направлена на устранение недочетов сборки или упрощения сложных элементов конструкции, которые не влияют на конечный расчет прочности [6] (в данном расчете в единое тело были объединены части

главной рамы, кузова, обшивки, кабины и кронштейна межсекционного шарнира, которые представлены в расчетной модели пятью самостоятельными компонентами). Отдельные места, требующие дополнительного расчета [7], либо являющиеся концентраторами напряжений на глобальной расчетной модели впоследствии можно уточнить субмоделированием.

### Метод расчета

Согласно [8], для оценки прочности по допускаемым напряжениям проверяются два режима: продольного нагружения автосцепок и движения с конструкционной скоростью.

В соответствии с п. 6.3.2.1 [8] для режима продольного нагружения автосцепок определяют сумму напряжений от нормативных продольных нагрузок на растяжение и сжатие (группа Г) и сил тяжести (группа А).

По п. 6.3.2.2 [8] для режима движения с конструкционной скоростью определяют сумму напряжений от действия нагрузок группы А с добавлением переменных напряжений, определяемых при конструкционной (транспортной) скорости, и напряжений от нагрузок группы Г. Продольную силу принимают 0,5 от силы группы Г.

Комбинация нагрузок для расчетных случаев представлена в табл. 1.

**Таблица 1.** Комбинация нагрузок  
**Table 1.** Load combination

Расчетный режим Settlement mode	Ускорение, мм/с <sup>2</sup> Acceleration, mm/s <sup>2</sup>			Растягивающее усилие, кН Tensile force, kN			Сжимающее усилие, кН Compressive force, kN		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1. Положение равновесия The position of equilibrium									
1	–	–	9 806,6	–	–	–	–	–	–
2. Режим продольного нагружения автосцепок The mode of longitudinal loading of automatic couplings									
2.1*	–	–	9 806,6	–	–	–	–1 500,0	–	–
2.2*	–	–	9 806,6	1 000,0	–	–	–	–	–
3. Режим движения с конструкционной скоростью The mode of movement at an operational speed									
3.1**	–	–	11 866,0	–	–	–	–750,0	–	–
3.2**	–	–	7 747,2	500,0	–	–	–	–	–

\*Расчетные случаи 2.1 и 2.2 возникают при приложении максимальной силы к переднему/заднему упору автосцепки.

\*\*Расчетные случаи 3.1 и 3.2 возникают при приложении половины от максимальной силы к переднему/заднему упору автосцепки и добавлении/убавлении составляющей коэффициента динамики к ускорению свободного падения.

\*The calculated cases 2.1 and 2.2 occur when the maximum force is applied to the front/rear stop of the automatic coupling.

\*\*The calculated cases 3.1 and 3.2 arise when half of the maximum force is applied to the front/rear stop of the automatic coupling and the component of the dynamics coefficient is added/subtracted to the acceleration of gravity.

### Критерий оценки прочности по допускаемым напряжениям

Оценка прочности по допускаемым значениям напряжений проводится в соответствии с п. 6.3.2.1 и 6.3.2.2 [8].

Согласно п. 6.3.2.1 действующие напряжения не должны превышать 90 % от предела текучести материала:

$$\sigma_{\max} \leq 0,9 \cdot \sigma_{0,2}.$$

Согласно п. 6.3.2.2 действующие напряжения не должны превышать 65 % от предела текучести материала:

$$\sigma_{\max} \leq 0,65 \cdot \sigma_{0,2}.$$

### Критерий оценки коэффициента запаса сопротивления усталости

Оценка прочности по допускаемым значениям коэффициентов запаса сопротивления усталости проводится, согласно пункту 6.3.2.3 [8] по формуле:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{(K \cdot \sigma_{\alpha}) + (\Psi \cdot \sigma_m)}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости стандартного образца при симметричном цикле нагружения, МПа;  $K$  – коэффициент концентрации, учитывающий понижение сопротивления усталости;  $\sigma_{\alpha}$  – амплитуда напряжений цикла, МПа;  $\Psi$  – коэффициент, характеризующий чувствительность металла к асимметрии цикла;  $\sigma_m$  – среднее напряжение цикла, МПа.

Коэффициент  $K$ , характеризующий понижение предела выносливости конструкции по отношению к пределу выносливости стандартного образца (коэффициент концентрации), рассчитывается по формуле:

$$K = \beta_k \cdot \frac{K_1 \cdot K_2}{K_3 \cdot K_4}.$$

В табл. 2 приведены поправочные значения для расчета коэффициентов и рекомендации по их выбору для конкретной конструкции.

Характеристики материалов, принятые в расчете [9], представлены в табл. 3, характеристики упругих элементов – в табл. 4.

**Таблица 2.** Поправочные значения для расчета коэффициентов запаса сопротивления усталости  
**Table 2.** Correction values for calculating fatigue resistance reserve coefficients

Обозначение Designation	Наименование показателя The name of the indicator	Рекомендации по выбору значений Recommendations for choosing values
$\sigma_{-1}$	Предел выносливости стандартного образца при симметричном цикле нагружения, МПа Fatigue limit stress of the standard sample with a symmetrical loading cycle, MPa	$(0,45-0,5) \cdot \sigma_b$ – для прокатной стали (for rolled steel); $0,4 \cdot \sigma_b$ – для литых сталей и алюминиевых сплавов (for cast steels and aluminum alloys)
$\sigma_{\alpha}$	Амплитуда напряжений цикла, МПа The amplitude of the cycle stresses, MPa	Значение определяется по данной методике The value is determined by this method
$\sigma_m$	Среднее напряжение цикла, МПа Average cycle stress, MPa	За средние напряжения цикла принимаются значения напряжений, полученные при статическом нагружении. Значение определяется по данной методике с учетом знака The stress values obtained under static loading are taken as the average cycle stresses. The value is determined by this method, taking into account the sign
$\Psi_{\sigma}$	Коэффициент, характеризующий влияние асимметрии цикла A coefficient characterizing the effect of cycle asymmetry	0,3 при $\sigma_m \geq 0$ ; 0 при $\sigma_m < 0$
$K_1$	Коэффициент, учитывающий влияние неоднородности материала детали	1,1 – для проката, поковки и штамповки (for rolling, forging and stamping);

	Coefficient that takes into account the influence of the heterogeneity of the part material	1,2–1,3 – для литых деталей (for cast parts)
$K_2$	Коэффициент, учитывающий влияние внутренних напряжений в детали A coefficient that takes into account the influence of internal stresses in the part	1,0 – при поперечном сечении до 250 мм (with a cross section of up to 250 mm); 1,0–1,2 – при поперечном сечении от 250 до 1 000 мм (with a cross section from 250 to 1 000 mm)
$K_3$	Коэффициент, учитывающий влияние абсолютных размеров детали Coefficient that takes into account the influence of the absolute dimensions of the part	1,0 – при поперечном сечении до 10 мм (with a cross section of up to 10 mm); 0,6–0,76 – при поперечном сечении до 200 мм (with a cross section of up to 200 mm)
$K_4$	Коэффициент, учитывающий состояние поверхности детали и в зависимости от способа обработки A coefficient that takes into account the condition of the surface of the part and depending on the processing method	1,0 – для полированной поверхности (for a polished surface); 0,9 – для поверхности после станочной обработки с обеспечением шероховатости (for the surface after machining with ensuring roughness); 0,8–0,85 – для поверхностей после грубой обработки на станке, обдирке, прокате (for surfaces after rough machining, roughing, rolling); 0,8 – для литья (for casting)
$\beta_k$	Эффективный коэффициент концентрации напряжений для различных форм геометрических концентраторов The effective stress concentration coefficient for various shapes of geometric concentrators	1 – при оценке прочности узлов по максимальным амплитудам напряжений цикла (т.е. в зоне концентрации напряжений) 1 – when assessing the strength of the nodes by the maximum amplitudes of the cycle stresses (i.e., in the stress concentration zone)

Таблица 3. Характеристики материалов

Table 3. Material characteristics

Деталь Detail	Материал Material	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> Density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Модуль Юнга $E$ , МПа Young's modulus $E$ , MPa	Коэффициент Пуассона $\mu$ Poisson's ratio $\mu$	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа Yield limit stress $\sigma_{0,2}$ , MPa	Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа Fatigue limit stress $\sigma_{-1}$ , MPa
Главная рама Underframe	09Г2С	7 850	$2 \cdot 10^5$	0,3	325	235*
Кузов Box	Ст3сп5	7 850	$2 \cdot 10^5$	0,3	245	195*
Обшивка Skin	Ст3сп5	7 850	$2 \cdot 10^5$	0,3	245	195*

\*Согласно п. 6.3.1, значения пределов выносливости получают по результатам испытаний на усталость натуральных деталей или определяют по пределам выносливости соответствующих материалов  $\sigma_{-1}$  с учетом концентрации напряжений в детали.

\*According to paragraph 6.3.1 the values of fatigue limit stress are obtained from the results of fatigue tests of full-scale parts or determined by the fatigue limit stress of the corresponding materials  $\sigma_{-1}$ , taking into account the stress concentration in the part.

Таблица 4. Характеристики упругих элементов  
Table 4. Characteristics of elastic units

Деталь Detail	Жесткость вдоль оси X $C_x$ , Н/мм Stiffness along the X axis $C_x$ , N/mm	Жесткость вдоль оси Y $C_y$ , Н/мм Stiffness along the Y axis $C_y$ , N/mm	Жесткость вдоль оси Z $C_z$ , Н/мм Stiffness along the Z axis $C_z$ , N/mm	Жесткость вокруг оси X $C_{\theta_x}$ , Н/мм <sup>°</sup> Stiffness around the X axis $C_{\theta_x}$ , N/mm <sup>°</sup>	Жесткость вокруг оси Y $C_{\theta_y}$ , Н/мм <sup>°</sup> Stiffness around the Y axis $C_{\theta_y}$ , N/mm <sup>°</sup>	Жесткость вокруг оси Z $C_{\theta_z}$ , Н/мм <sup>°</sup> Stiffness around the Z axis $C_{\theta_z}$ , N/mm <sup>°</sup>
Пружина Spring	0	0	1 000*	0	0	0

\*Жесткость пружины задана в локальной системе координат, где ось Z располагается вдоль продольной оси пружины.

\*The spring stiffness is set in a local coordinate system, where the Z axis is located along the longitudinal axis of the spring.

### Граничные условия и расчетная схема

К шкворневым втулкам на рис. 2 по внутренней поверхности приложены ограничения на перемещение по оси Y со смещением по оси Z на 500 мм (имитация высоты шкворня). Втулки шкворней соединены с главной рамой контактом типа «склейка».

Обшивка соединена с каркасом и основанием кузова контактом типа «склейка» по зазорам из исходной геометрии и по кронштейнам и уголкам (рис. 3) [10]. Также в реальной конструкции каждое касание труб каркаса кузова с обшивкой по возможности (в легкодоступных местах) проваривается прерывистым швом, на модели подобное соединение представлено контактом типа «склейка», имитирующее сплошной шов [11].

К площадкам для установки тележки

приложены упругие элементы с жесткостью  $C_z = 1\,000$  Н/мм со смещением по оси Z на 1 700 мм (имитация высоты тележки) (рис. 4).

Упоры поглощающего аппарата [12] соединены с главной рамой контактом типа «склейка» по кромкам боковых поверхностей (рис. 5).

Кузов соединен с главной рамой контактом типа «склейка» по поверхностям соприкосновения (каркас кузова с главной рамой сваривается по контуру и по хребтовым балкам) (рис. 6).

Нижняя часть кабины соединена с подрамником главной рамы контактом типа «склейка» по поверхностям касания (рис. 7). Задняя часть кабины соединена с кузовом контактом типа «склейка» по поверхностям касания при помощи дополнительной соединительной рамы.

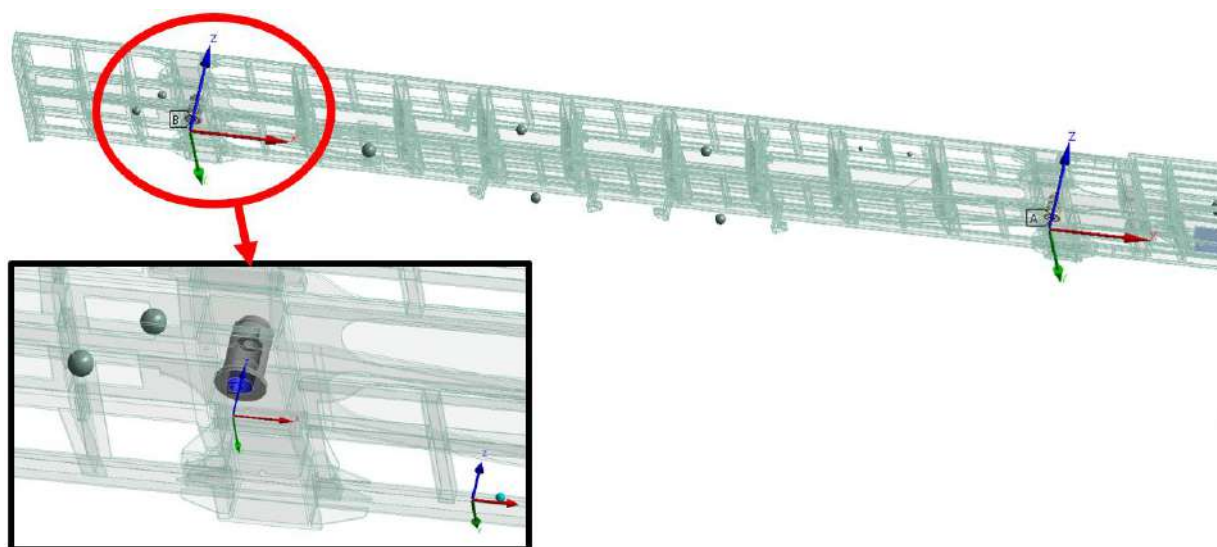


Рис. 2. Граничные условия для шкворневых втулок  
Fig. 2. Boundary conditions for center pivot bushings

К проушине межсекционного шарнира на рис. 8 приложено ограничение на перемещение по оси X в глобальной системе координат. Сам кронштейн межсекционного шарнира соединен

с главной рамой контактом типа «склейка» по контуру стыка плиты с лобовым листом и по контуру стыка коробчатой части с хребтовыми балками.

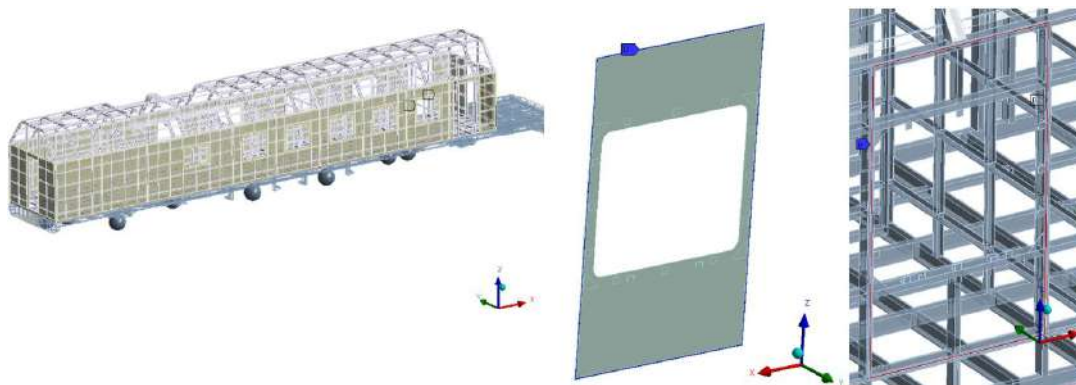


Рис. 3. Контакт обшивки с кузовом  
Fig. 3. Skin contacts with the body

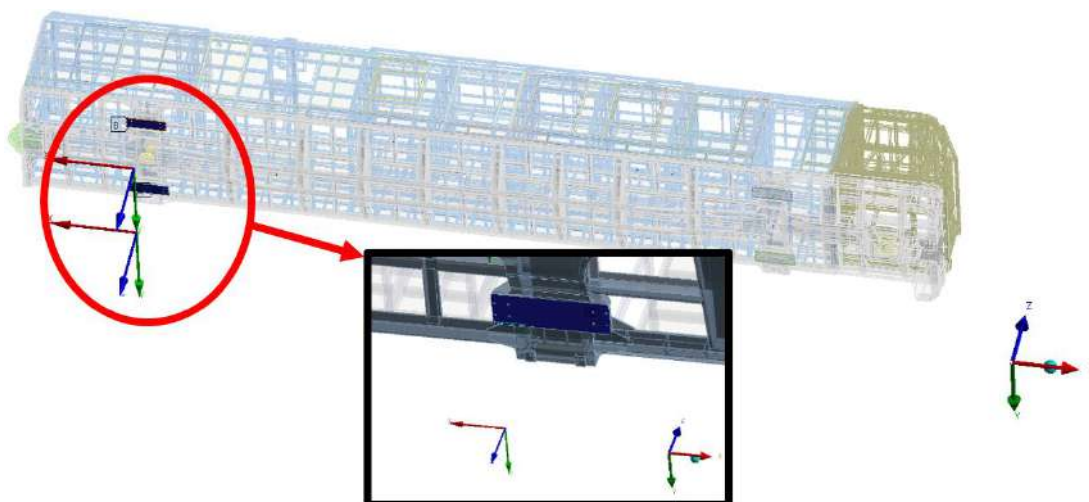


Рис. 4. Установка тележек  
Fig. 4. Installation of bogies

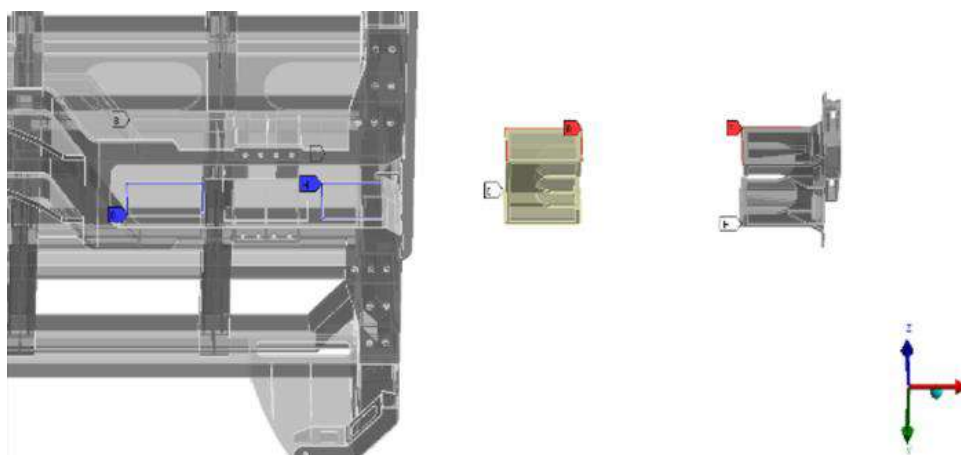
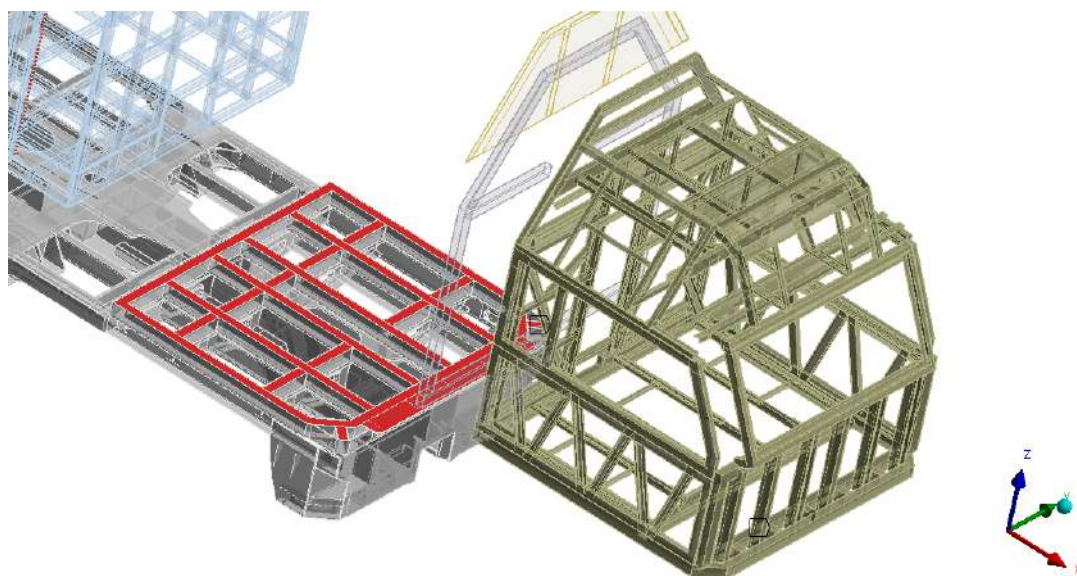


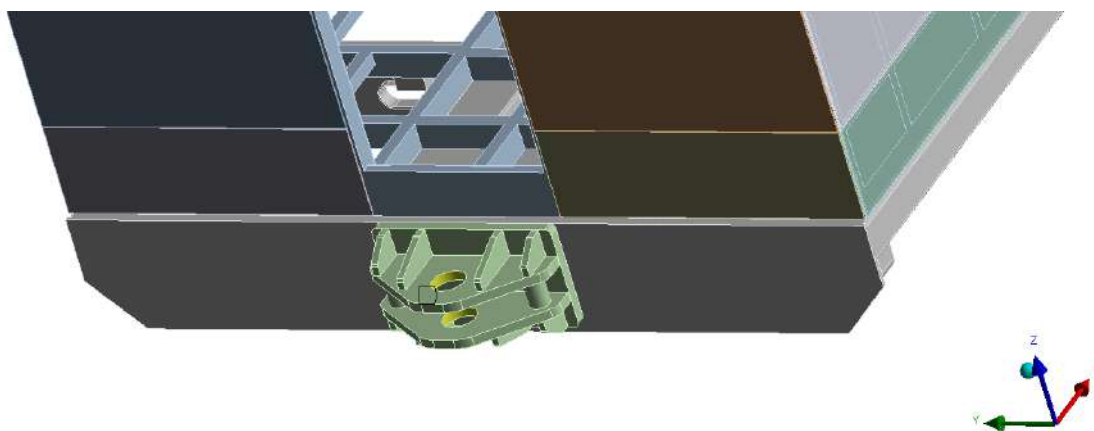
Рис. 5. Установка упоров  
Fig. 5. Installation of stops



**Рис. 6.** Соединение главной рамы с каркасом кузова  
**Fig. 6.** Connection of the underframe with the body frame



**Рис. 7.** Соединение кабины с главной рамой и каркасом кузова  
**Fig. 7.** Connection of the cabin to the underframe and the body frame



**Рис. 8.** Граничные условия кронштейна межсекционного шарнира  
**Fig. 8.** Boundary conditions of the bracket of the intersectional hinge



Растягивающее усилие прикладывается к ударным поверхностям переднего упора поглощающего аппарата, сжимающее усилие – к ударным поверхностям заднего упора поглощающего аппарата [13]. Конструкция догружена точечными и распределенными массами для соблюдения условия реализации 25 т на ось. Болтовые соединения учитывают в расчете с помощью балочных элементов с моментом затяжки не менее  $500 \text{ Н} \cdot \text{м}$  [14]. Оставшиеся контактирующие части, не указанные ранее, задаются контактом с трением с коэффициентом  $\mu = 0,2$ . Расчетная модель была разбита сеткой, состоящей из 4 069 318 узлов и 2 274 366 элементов.

### Результаты расчетного исследования

Выполненный расчет показал, что эквивалентные напряжения при эксплуатации специального подвижного состава в транспортном режиме находятся в пределах допустимых, поэтому было уделено внимание расчету конструкции на усталость. Итоговые распределения амплитудных и средних напряжений показаны на рис. 9 (слева до модернизации, справа – после). Переход шкворневой балки в хребтовые выполнен под углом, который способствует высокой концентрации напряжений, также данная конструкция плохо воспринимает изгиб из-за большого угла деформации [15]. Переход шкворневой балки к стяжному ящику выполнен

с конструкцией радиуса округления с острыми окончаниями, который на стыке свариваемых частей создает дополнительный концентратор напряжений [16]. Этот же лист оказался слишком тонким для адекватного распределения нагрузок, приходящихся на главную раму от изгиба подкабинной части [15].

### Предложения по модернизации конструкции

Зона изгиба при переходе шкворневой балки в хребтовые была отодвинута на расстояние не менее 10 см от зоны сварки. К частям хребтовых балок в областях, страдающих от чрезмерных изгибных напряжений, были приварены накладки, поддерживающие нижние хорды хребтовых балок и обеспечивающие равномерную передачу нагрузки. Радиус скругления возле стяжного ящика был разбит на два со ступенчатым переходом, чтобы перераспределить напряжения и отодвинуть подобные однопутные зоны передачи нагрузок от мест сварки и изменения толщин. Толщина листа перехода шкворневой балки в стяжной ящик была увеличена на 5 мм. Для более надежной передачи нагрузок была увеличена ширина поперечной балки, следующей за шкворневой в сторону стяжного ящика. После учета предложенных изменений, область шкворневой балки главной рамы специального подвижного состава соответствует требованиям в части усталостной прочности [8].

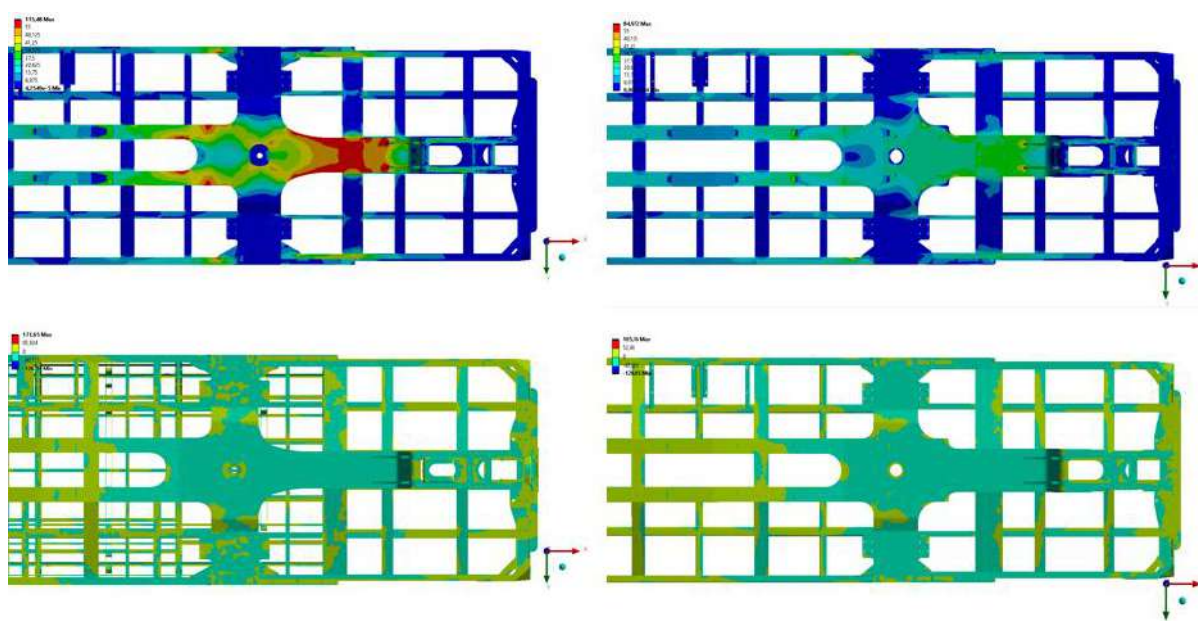


Рис. 9. Распределение амплитудных и средних напряжений в главной раме в двух вариантах исполнения конструкции

Fig. 9. Distribution of amplitude and average stresses in the underframe in two versions of the design

## Заключение

В статье был представлен анализ прочности конструкции области шкворневой балки главной рамы специального подвижного состава по разработанной методике и последующие ее улучшения. Целью исследования было выявление мест возникновения контактно-усталостных повреждений [17] в данной конструкции с последующей разработкой рекомендаций по ее модернизации для повышения надежности и безопасности. На основе анализа предложены конкретные рекомендации по модернизации конструкции, включая использование новых технологий сборки и методов усиления. Установлено, что одними из самых недостаточно раскрытых мест в подобных конструкциях являются сварные соединения [18], для которых до сих пор не разработана

явная методика моделирования, расчета и оценки прочности [19].

Анализ показал, что минимальный коэффициент запаса сопротивления усталости исходной конструкции  $n_{исх} = 1,21$ , а модернизированной конструкции  $n_{мод} = 1,62$ , при допуске  $n = 1,5$ . Таким образом, предложенные изменения позволяют улучшить показатели коэффициентов запаса сопротивления усталости главной рамы на 35 %, что соответствует требованиям в части усталостной прочности [8].

В будущих исследованиях планируется доработать прототип главной рамы до более благоприятного распределения напряжений в этой критически важной зоне, а также применить новую консервативно-приближенную методику моделирования сварных соединений.

## Список литературы

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М. : Машиностроение, 1984. 312 с.
2. О принятии технических регламентов Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава», «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» и «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта»: утв. решением комиссии Таможенного союза № 710 от 15.07.2011 г (ред. 30.03.2023). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
3. Opala M. Evaluation of bogie centre bowl friction models in the context of safety against derailment simulation predictions // Archive of Applied Mechanics. 2018. Vol. 88. Iss. 6. P. 943–953. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00419-018-1351-4>.
4. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М. : Мир, 1977. 349 с.
5. Оганьян Э.С., Волохов Г.М. Расчеты и испытания на прочность несущих конструкций локомотивов. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2013. 324 с.
6. Маковкин Г.А., Лихачева С.Ю. Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела. Ч. 1. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2012. 71 с.
7. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимации. М. : Мир, 1986. 318 с.
8. ГОСТ 31846–2012. Специальный подвижной состав. Требования к прочности несущих конструкций и динамическим качествам. Введ. 2014–01–01. М. : Стандартинформ, 2013. 70 с.
9. Марочник сталей и сплавов / под общей ред. А.С. Зубченко. М. : Машиностроение, 2003. 784 с.
10. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев : Наук. думка, 1988. 736 с.
11. Sasmito A., Irawadi Y., Soebagyo H. Analisis of Welding Crack on The Under Frame of Wagon for Cement Bags Transportation Using Euro Code, Measurement and Finite Element // IIW 2018 - International Conference on Advanced Welding and Smart Fabrication Technologies. Bali, 2018. Vol. 269. DOI 10.1051/mateconf/201926903003.
12. ГОСТ 34710–2021. Упоры автосцепного устройства грузовых и пассажирских вагонов. Общие технические условия. Введ. 2021–11–01. М. : Стандартинформ, 2021. 36 с.
13. ГОСТ 33434–2015. Устройство сцепное и автосцепное железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки. Введ. 2016–09–01. М. : Стандартинформ, 2016. 20 с.
14. Волошин А.А., Григорьев Г.Т. Расчет и конструирование фланцевых соединений. Л. : Машиностроение, 1972. 136 с.
15. Иванов М.Н. Детали машин. М. : Высш. шк., 2000. 383 с.
16. Failure analysis of a train coach underframe / J.J.J. De Cisneros Fonfría, E. Olmeda, S. Sanz et al. // Engineering Failure Analysis. 2024. Vol. 156. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107756.
17. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. М. : Мир, 1984. 624 с.
18. Майзель В.С., Навроцкий Д.И. Сварные конструкции. Л. : Машиностроение, 1973. 304 с.
19. Покровский А.М. Разработка расчетных методов анализа прочности крупногабаритных прокатных валков при термообработке и прессовой посадке : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2003. 305 с.

## References

1. Bolotin V.V. Prognozirovanie resursa mashin i konstruksii [Forecasting the service life of machines and structures]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984. 312 p.
2. Reshenie komissii Tamozhennogo soyuza № 710 ot 15.07.2011 g «O prinyatii tekhnicheskikh reglamentov Tamozhennogo soyuza «O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava», «O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozh-

nogo transporta» i «O bezopasnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta» (red. 30.03.2023) [Decision of the Customs Union Commission No 710 dated July 15, 2011 «On the adoption of the technical regulations of the Customs Union «On the safety of railway rolling stock», «On the safety of high-speed rail transport» and «On the safety of railway transport infrastructure» (ed. March 30, 2023)].

3. Opala M. Evaluation of bogie centre bowl friction models in the context of safety against derailment simulation predictions. *Archive of Applied Mechanics*, 2018, vol. 88, iss. 6, pp. 943–953. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00419-018-1351-4>.

4. Strang G., Fix G.J. Teoriya metoda konechnykh elementov [An Analysis of the Finite Element Method]. Moscow: Mir Publ., 1977. 349 p.

5. Ogan'yan E.S., Volokhov G.M. Raschety i ispytaniya na prochnost' nesushchikh konstruktssii lokomotivov [Calculations and tests for the strength of load-bearing structures of locomotives]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2013. 324 p.

6. Makovkin G.A., Likhacheva S.Yu. Primenenie MKE k resheniyu zadach mekhaniki deformiruемого твердого тела. Chast' 1 [Application of FEM to solving problems of mechanics of deformable solids. Part 1]. Nizhnii Novgorod: NNGASU Publ., 2012. 71 p.

7. Zienkiewicz O.C., Morgan K. Konechnye elementy i approksimatsii [Finite elements and approximations]. Moscow: Mir Publ., 1986. 318 p.

8. GOST 31846–2012. Spetsial'nyi podvizhnoi sostav. Trebovaniya k prochnosti nesushchikh konstruktssii i dinamicheskim kachestvam [State Standard 31846–2012. Special rolling stock. Requirements for bearing structure strength and for dynamic properties]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 70 p.

9. Marochnik stalei i splavov [Brand of steels and alloys] / Ed. by Zubchenko A.S. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p.

10. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Handbook of Strength of Materials]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1988. 736 p.

11. Sasmito A., Irawadi Y., Soebago H. Analisis of Welding Crack on The Under Frame of Wagon for Cement Bags Transportation Using Euro Code, Measurement and Finite Element. *IIV 2018 - International Conference on Advanced Welding and Smart Fabrication Technologies*. Bali, 2018, vol. 269. DOI 10.1051/mateconf/201926903003.

12. GOST 34710–2021. Upory avtostsepnogo ustroystva gruzovykh i passazhirskikh vagonov. Obschie tekhnicheskie usloviya [State Standard 34710–2021. Stops of automatic coupler equipment of freight and passenger cars. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 36 p.

13. GOST 33434-2015. Ustroystvo stepnoe i avtostsepnoe zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tekhnicheskie trebovaniya i pravila priemki [State Standard 33434-2015. Coupler and automatic coupler device of railway rolling stock. Technical requirements and acceptance rules]. Moscow: Standartinform Publ., 2016. 20 p.

14. Voloshin A.A., Grigor'ev G.T. Raschet i konstruirovaniye flantsevykh soedinenii [Calculation and design of flange connections]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1972. 136 p.

15. Ivanov M.N. Detali mashin [Machine Details]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 2000. 383 p.

16. De Cisneros Fonfría Ju.J.J., Olmeda E., Sanz S., Garrosa M., Diaz V. Failure analysis of a train coach underframe. *Engineering Failure Analysis*, 2024, vol. 156. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107756.

17. Collins J.A. Povrezhdenie materialov v konstruktssiyakh. Analiz, predskazanie, predotvrashchenie [Failure of Materials in Mechanical Design. Analysis. Prediction. Prevention]. Moscow: Mir Publ., 1984. 624 p. (Russ. ed.: Dzh. Kollinz. Povrezhdenie materialov v konstruktsiyakh. Analiz, predskazanie, predotvrashchenie Moscow, Mir Publ., 1984. 624 p.).

18. Maizel' V.S., Navrotskii D.I. Svarnye konstruktssii [Welded structures]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1973. 304 p.

19. Pokrovskii A.M. Razrabotka raschetnykh metodov analiza prochnosti krupnogabaritnykh prokatnykh valkov pri termoobrabotke i pressovoi posadke [Development of calculation methods for analyzing the strength of large-sized rolling rolls during heat treatment and press fit]. Doctor's theses. Moscow, 2003. 305 p.

### Информация об авторах

**Савельев Михаил Михайлович**, аспирант научного центра тяги поездов, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ); инженер 2-й категории, ООО «Синара Алгоритм», г. Москва; e-mail: [SavelevMM@internet.ru](mailto:SavelevMM@internet.ru).

**Федорова Вероника Игоревна**, кандидат технических наук, технический эксперт научного центра «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва; доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: [Fedorova.Veronika@vniizht.ru](mailto:Fedorova.Veronika@vniizht.ru).

**Жавыркин Вадим Витальевич**, аспирант кафедры наземных и транспортно-технологических средств, Российский университет транспорта (МИИТ); руководитель отдела прочности, ООО «Синара Алгоритм», г. Москва; e-mail: [ZhavyrkinV@mail.ru](mailto:ZhavyrkinV@mail.ru).

### Information about the authors

**Mikhail M. Savel'ev**, Ph.D. student of the Scientific Center of Train Traction, Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT); 2 class engineer, LTD «Sinara Algorithm», Moscow; e-mail: [SavelevMM@internet.ru](mailto:SavelevMM@internet.ru).

**Veronika I. Fedorova**, Ph.D. in Engineering Science, Technical Expert of the Scientific Center «Infrastructure», Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow; Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: [Fedorova.Veronika@vniizht.ru](mailto:Fedorova.Veronika@vniizht.ru).

**Vadim V. Zhavyrkin**, Ph.D. Student of the Department of Land Transport Technology Facilities, Russian University of Transport (MIIT); the Head of the Strength Department, LTD «Sinara Algorithm», Moscow; e-mail: [ZhavyrkinV@mail.ru](mailto:ZhavyrkinV@mail.ru).

## Гидравлическая стабилизация крена вагона

О.Л. Маломыжев<sup>1</sup>✉, Д.О. Маломыжев<sup>1</sup>, С.В. Павлов<sup>2</sup>, А.Г. Семенов<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>ООО «ПетроРемСтрой», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉olm@bk.ru

### Резюме

В процессе движения железнодорожного вагона неизбежно возникают боковые силы, обусловленные движением в кривой, наличием бокового ветра, рысканием тележки вагона и т.д. Такие силы вызывают крен или боковую качку вагона, что влияет на его устойчивость, приводят к циклически изменяющимся по величине нагрузкам на все элементы, могут перемещать расположенный в вагоне груз, а также вызывать дискомфорт у пассажиров. Наиболее выражены описанные проявления у скоростных поездов и двухэтажных пассажирских вагонов. В настоящее время для снижения крена и боковой качки используют торсионные стабилизаторы поперечной устойчивости, обеспечивающие в достаточной мере поставленные перед ними задачи. При этом торсионные стабилизаторы не лишены недостатков, к основным из которых следует отнести упругую закрутку торсиона, неизбежно вызывающую возникновение частичного крена вагона под действием боковой силы, а также невозможность регулирования момента сопротивления крену в зависимости от степени загрузки вагона. Современная тенденция роста скоростей движения пассажирских и грузовых поездов требует повышения уровня стабилизации крена с допустимостью регулирования стабилизатора. В статье рассматривается альтернативная торсионной гидравлическая система стабилизации крена вагона, обеспечивающая большую эффективность, позволяющая автоматически изменять момент сопротивления крену вагона с учетом его загрузки. Дополнительные возможности гидравлической стабилизации крена вагона создают предпосылки для ее применения на современных скоростных поездах.

### Ключевые слова

железная дорога, вагон, крен вагона, стабилизация поперечной устойчивости, скоростные поезда, боковая сила, боковая качка вагона

### Для цитирования

Гидравлическая стабилизация крена вагона / О.Л. Маломыжев, Д.О. Маломыжев, С.В. Павлов, А.Г. Семенов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 35–43. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).35-43.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 15.04.2024 г.; принята к публикации: 17.04.2024 г.

## Hydraulic stabilization of the wagon heeling

O.L. Malomyzhev<sup>1</sup>✉, D.O. Malomyzhev<sup>1</sup>, S.V. Pavlov<sup>2</sup>, A.G. Semenov<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>PetroRemStroi LLC, Saint Petersburg, the Russian Federation

<sup>3</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, the Russian Federation

### Abstract

In the process of moving a railway carriage, lateral forces inevitably arise due to movement in a curve, the presence of a crosswind, yawing of the carriage trolley, and others. Such forces cause, respectively, a roll or lateral rocking of the wagon, which affects its stability, causes cyclically varying loads on all elements, can move the cargo located in the wagon, and also cause discomfort to passengers. The description is most pronounced for high-speed trains and double-decker passenger wagons. Currently, torsion bar stabilizers are used to reduce roll and lateral pitching, which sufficiently ensure the tasks assigned to them. At the same time, torsion stabilizers are not without their faults, the main ones of which include the elastic torsion twist, which inevitably causes the occurrence of a partial roll of the wagon under the influence of lateral force, as well as the inability to regulate the moment of roll resistance depending on the degree of loading of the wagon. The current trend of increasing the speeds of passenger and freight trains requires increasing the levels of stabilization of the crane, with the possibility of adjusting the stabilizer. The article considers an alternative torsion hydraulic system for stabilizing the roll of the wagon, which provides greater efficiency, allowing to automatically change the moment of resistance to the roll of the wagon, depending on the degree of its loading. Additional possibilities of hydraulic roll stabilization of the carriage provide the prospect of its application on modern high-speed trains.

### Keywords

railway, wagon, roll of the wagon, stabilization of lateral stability, high-speed trains, lateral force, lateral rolling of the wagon

**For citation**

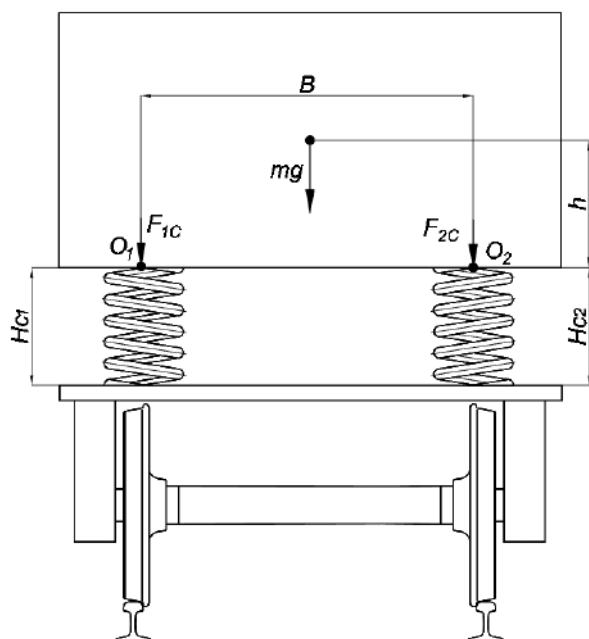
Malomyzhev O.L., Malomyzhev D.O., Pavlov S.V., Semenov A.G. Gidravlicheskaya stabilizatsiya krena vagona [Hydraulic stabilization of the wagon heeling]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 35–43. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).35-43.

**Article info**

Received: April 9, 2024; Revised: April 15, 2024; Accepted: April 17, 2024.

**Введение**

Для обеспечения плавности хода вагона в его ходовой части используют упругие элементы, расположенные между его кузовом и частью подвески, непосредственно взаимодействующей с рельсами и копирующей все имеющиеся неровности. Наиболее распространенными упругими элементами являются листовые рессоры, пружины, торсионы, пневматические рессоры. В зависимости от типа упругого элемента может потребоваться использование направляющего аппарата подвески, исключающего перемещение кузова в ненужных направлениях (влево, вправо, вперед и пр.) [1, 2]. На рис. 1 представлена схема подвески вагона.



**Рис. 1.** Схема подвески вагона:

$h$  – высота расположения центра тяжести относительно верхней части упругих элементов;  
 $B$  – расстояние между осями упругих элементов

**Fig. 1.** Wagon suspension scheme:

$h$  – the height of the center of gravity relative to the upper part of the elastic elements;  
 $B$  – the distance between the axes of the elastic elements

В данном случае упругими элементами являются пружины. Для пояснения работы стабилизатора поперечной устойчивости вагона нет принципиальной разницы, какие упругие элементы используются. Также для упрощения пояснительных рисунков на схеме не изображены направляющие элементы и гасители колебаний. Данные элементы никак не связаны с работой стабилизатора поперечной устойчивости.

При неподвижном состоянии вагона, а также при прямолинейном движении по идеальному пути на каждый из упругих элементов действует сила:

$$F_{c_1} = F_{c_2} = \frac{mg}{2},$$

где  $m$  – подрессоренная масса вагона;  $g$  – ускорение силы тяжести [3].

В таком состоянии каждый упругий элемент будет иметь длину:

$$H_{c_1} = H_{c_2} = H_{св} - \frac{mg}{2} \cdot \frac{1}{k},$$

где  $H_{св}$  – длина упругого элемента в свободном состоянии (без нагрузки);  $k$  – жесткость упругого элемента.

Если в процессе движения вагона появятся изменяющиеся по величине боковые силы, то подрессоренная масса может начать раскачиваться.

Для исключения эффекта раскачивания в подвесках применяют фрикционные и гидравлические гасители колебаний. В данном примере работа гасителей колебаний рассматриваться не будет. Условно считается, что они отсутствуют в подвеске.

Если в процессе движения на подрессоренную массу будет действовать боковая сила  $F_b$ , обусловленная либо центростремительным ускорением при движении в кривой, либо боковым ветром, либо извилистым движением колесных пар на прямых участках, то это вызовет изменение сил, действующих на упругие элементы (рис. 2).

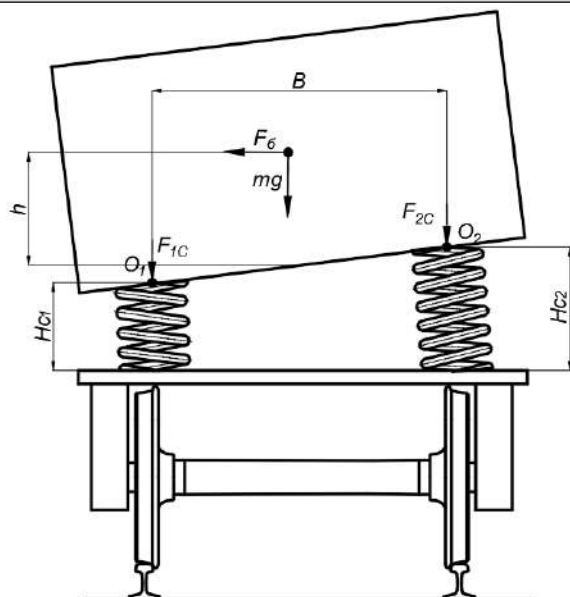


Рис. 2. Расположение кузова вагона под действием боковой силы

Fig. 2. The location of the wagon body under the influence of lateral force

Таким образом, на упругий элемент 1 будет действовать сила  $\sum F_1 = F_{c1} + F_6 \cdot h/B$ , а на упругий элемент 2 –  $\sum F_2 = F_{c2} - F_6 \cdot h/B$  [3–5].

Изменение сил, действующих на пружины, вызовет изменение их длины: увеличение силы, действующей на левую пружину, уменьшит ее длину, а уменьшение силы, действующей на правую пружину, вызовет увеличение ее длины. В итоге происходит наклон (крен) подрессоренной массы – кузова вагона.

Для уменьшения крена используют устройства с изменяемой жесткостью упругих элементов. Примером такого устройства являются пневматические рессоры, применяемые на скоростных поездах («Сапсан», «Ласточка») и двухэтажных вагонах [6, 7]. Известно, что жесткость пневматического упругого элемента (рессоры) зависит от внутреннего давления воздуха. В перечисленных поездах используются устройства автоматической регулировки давления в пневморессорах. При возникновении боковой силы  $F_6$  и сопутствующего крена вагона (см. рис. 2) происходит дополнительное наполнение левой пневморессоры сжатым воздухом и увеличение в ней внутреннего давления (т.е. увеличение жесткости), одновременно с этим в правой пневморессоре происходит снижение давления воздуха (уменьшение жесткости). В итоге длины пневморессор компенсируются и крен кузова уменьшается.

Практический опыт эксплуатации систем стабилизации поперечной устойчивости кузова путем изменения жесткости пневматических упругих элементов показал их недостаточную эффективность, обусловленную инерционностью системы (изменение внутреннего давления воздуха в пневматических упругих элементах протекает относительно долго). Этот недостаток потребовал применения дополнительных устройств, препятствующих крену кузова [8–11].

Целью данной статьи является конструктивное предложение совершенствования системы стабилизации поперечной устойчивости вагонов, обеспечивающей автоматическое изменение момента сопротивления крену вагона в зависимости от степени его загрузки и, соответственно, возможности увеличения скоростей движения поездов.

### Анализ задачи

Одним из наиболее распространенных устройств стабилизации поперечной устойчивости вагонов является торсионный стабилизатор [12–14]. Жесткость торсионного стабилизатора – постоянная величина и не зависит от режимов движения вагона, а также от степени его загрузки. Несмотря на недостатки торсионного стабилизатора, он занимает лидирующее место как в автомобильном, так и в железнодорожном транспорте вследствие его относительной простоты в изготовлении и низкой стоимости.

Торсионный стабилизатор устанавливается между подрессоренной и неподрессоренной массами вагона (рис. 3).

При возникновении нагрузки в вертикальной плоскости (рис. 4) происходит поворот амортизатора вокруг своей оси вращения, и он не оказывает никакого влияния на работу подвески.

При возникновении боковой силы  $F_6$ , вызывающей крен кузова (рис. 5), левый кронштейн крепления торсиона к подрессоренной части кузова вагона перемещается вниз, а его левый край остается практически на той же высоте, что и до возникновения боковой силы. Так как торсион представляет собой единую конструкцию, его правый кронштейн также стремится переместиться вниз, приближая значения к равенству  $H_{c1} \approx H_{c2}$  (сохранить кузов в горизонтальном положении) [15–17].

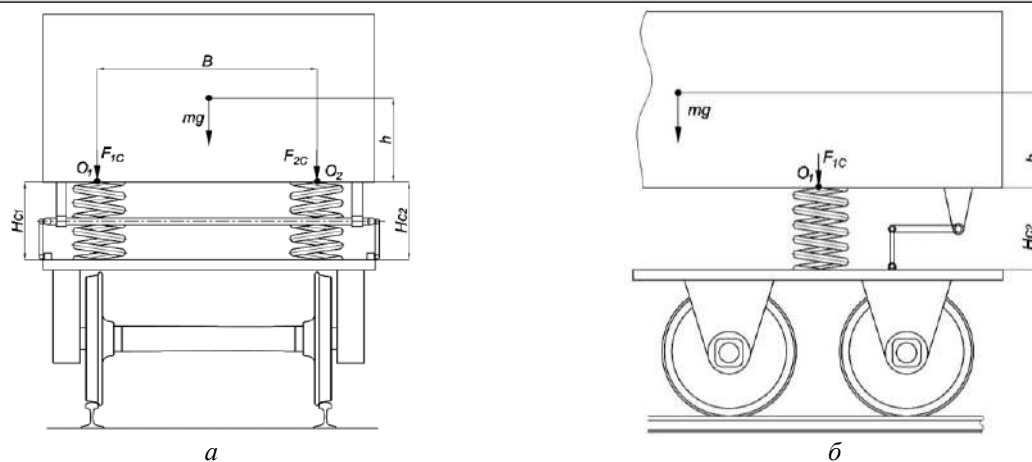


Рис. 3. Торсионный стабилизатор:

а – вид спереди; б – вид сбоку

Fig. 3. Torsion stabilizer:

а – front view; б – side view

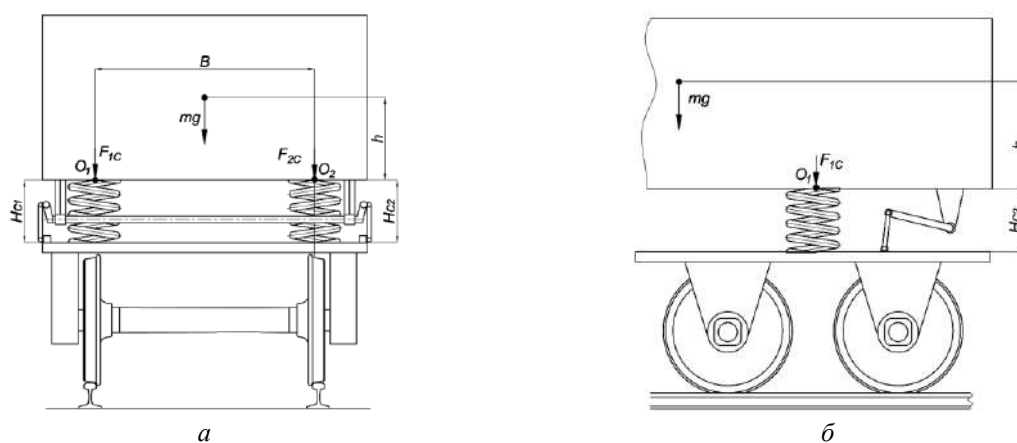


Рис. 4. Торсионный стабилизатор при воздействии вертикальной нагрузки:

а – вид спереди; б – вид сбоку

Fig. 4. Torsion stabilizer under the influence of vertical load:

а – front view; б – side view

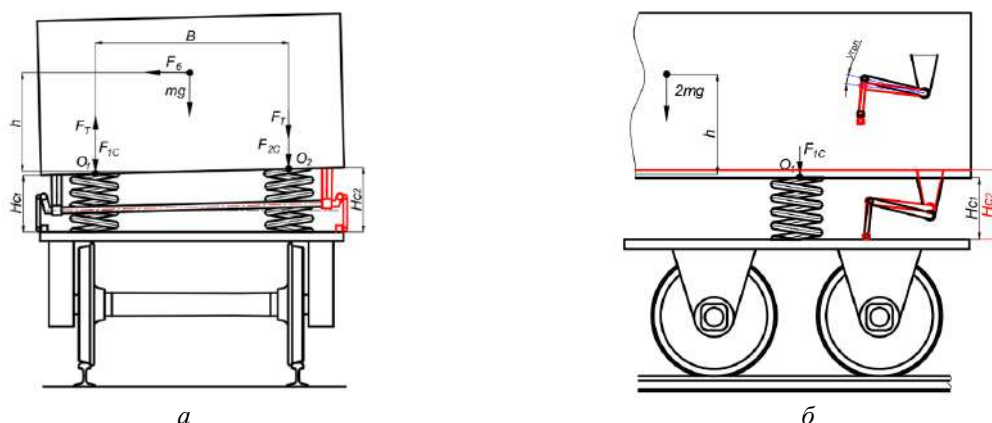


Рис. 5. Торсионный стабилизатор при воздействии боковой нагрузки:

а – вид спереди; б – вид сбоку

Fig. 5. Torsion stabilizer under the influence of lateral load:

а – front view; б – side view

Фактически в точке  $O_1$  возникает дополнительная сила  $F_T$ , направленная вверх, обусловленная необходимостью закручивания торсиона и препятствующая сжатию левой пружины. Одновременно торсион создает своим правым краем в точке  $O_2$  силу  $F_T$ , направленную вниз и препятствующую увеличению длины правой пружины. Нетрудно отметить, что сила  $F_T$  возникает только в процессе закручивания торсиона и пропорциональна углу закручивания последнего (см. рис. 5). Таким образом, при применении торсиона с абсолютной жесткостью крен кузова практически будет отсутствовать. Соответственно, чем меньше жесткость торсиона, тем больше угол крена. В то же время можно отметить, что при увеличении загрузки вагона и прочих равных условиях, в том числе постоянной жесткости торсиона, крен вагона будет увеличиваться. На сегодняшний день для стабилизации поперечной устойчивости вагонов используют торсионы с жесткостью, обеспечивающей допустимый крен вагона. В итоге упругие свойства торсионного стабилизатора поперечной устойчивости являются скорее его недостатком, чем достоинством.

Для устранения недостатков торсионного стабилизатора поперечной устойчивости допустимо применение гидравлического стабилизатора поперечной устойчивости [18] (никакого отношения к гидравлическим гасителям колебаний он не имеет и упругие элементы подвески также к нему никак не относятся).

На рис. 6 представлена схема стабилизации поперечной устойчивости кузова вагона с применением гидравлического стабилизатора.

Гидравлический стабилизатор поперечной устойчивости представляет собой два гидравлических цилиндра двойного действия, установленных между подрессоренной и непрорессоренной массами вагона таким образом, что их штоки шарнирно соединены с подрессоренной массой, а корпуса цилиндров – с непрорессоренной массой.

Цилиндры гидравлически связаны между собой так, что подпоршневая полость каждого связана с надпоршневой полостью соседнего. В рассматриваемом примере пренебрегаем объемом, который занимает шток поршня в надпоршневой полости (компенсацию объема штока можно обеспечить включением в гидросистему дополнительного компенсационного цилиндра). Из рис. 6 видно, что при равномерном увеличении нагрузки на оба упругих элемента, поршни обоих цилиндров переместятся на равное расстояние и вытеснят одинаковые объемы жидкости в надпоршневые пространства противоположных цилиндров. В итоге гидравлический стабилизатор, подобно торсионному, не будет оказывать какого-либо влияния на работу упругих элементов. При возникновении боковой силы наиболее нагруженный цилиндр будет выталкивать объем жидкости из подпоршневой полости в надпоршневую противоположного цилиндра и вызывать тем самым синхронное перемещение его поршня и штока

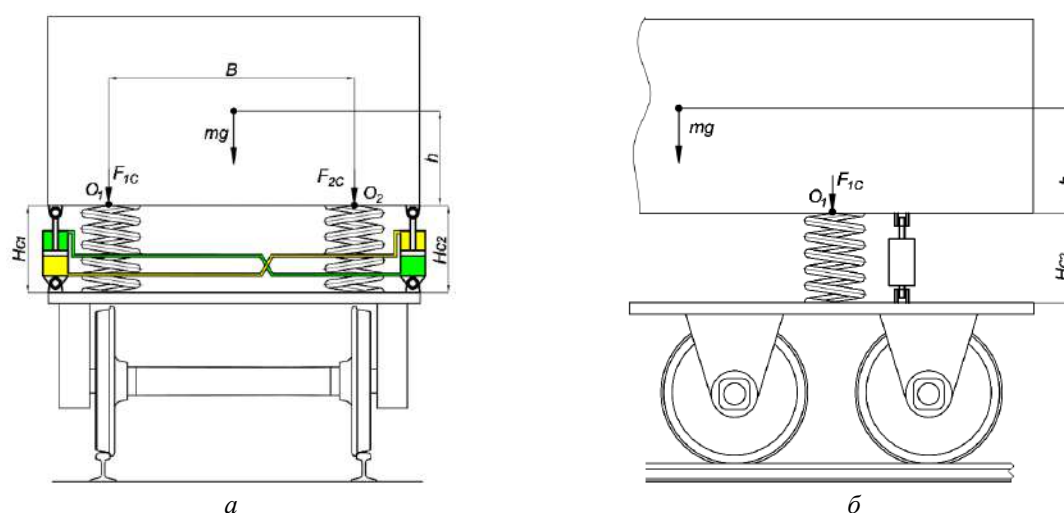


Рис. 6. Гидравлический стабилизатор:

$a$  – вид спереди;  $b$  – вид сбоку

Fig. 6. Hydraulic stabilizer:

$a$  – front view;  $b$  – side view



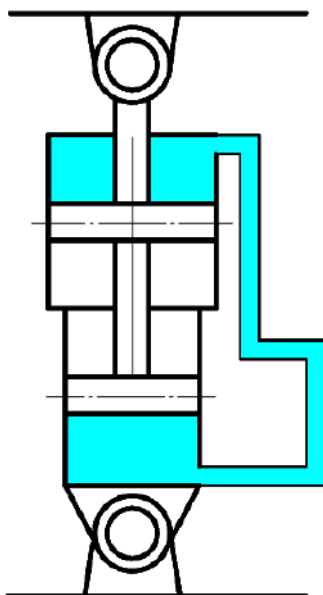
вниз. При этом, если считать жидкость несжимаемой, крен кузова возникать не будет [19]. Иначе говоря, рассматриваемая система будет вести себя аналогично торсионному стабилизатору с абсолютной жесткостью.

Таким образом, гидравлический стабилизатор поперечной устойчивости не имеет недостатка, присущего торсионному – скручиваемости. Дополнительно гидравлический стабилизатор поперечной устойчивости не имеет громоздкого торсиона, требующего наличия кронштейнов со сложными шарнирами для его крепления и возможности поворота в двух плоскостях.

### Способы применения гидравлического стабилизатора поперечной устойчивости вагона

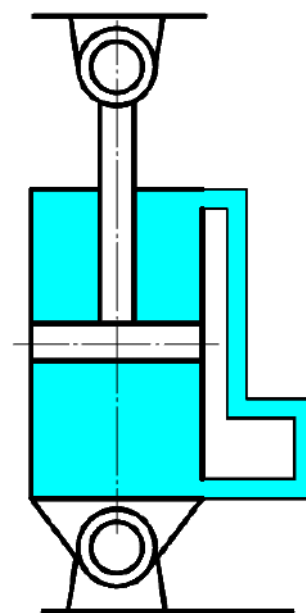
Для решения поставленной задачи проведен анализ работы гидроцилиндров двойного действия различных конструкций.

На рис. 7 изображен цилиндр, у которого при перемещении штока из полости, куда движется поршень, выталкивается объем жидкости, равный увеличению объема полости, из которой выдвигается поршень. Соответственно, два таких цилиндра можно связать путем соединения штоковой полости каждого из цилиндров с бесштоковой полостью другого.

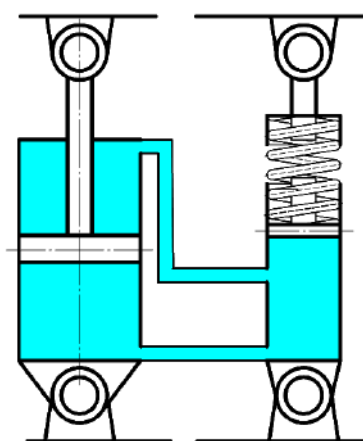


**Рис. 7.** Гидроцилиндр с равными активными площадями поршней  
**Fig. 7.** Hydraulic cylinder with equal active areas of pistons

На рис. 8 изображен цилиндр, шток которого переместить, например, вниз невозможно, так как объем вытолкнутой жидкости из бесштоковой полости будет больше высвободившегося объема в штоковой полости. Для возможности перемещения штока вниз необходима емкость, в которую будет выталкиваться избыток жидкости. Схема, обеспечивающая подвижность цилиндра (рис. 8), приведена на рис. 9. На ней появился компенсационный цилиндр.



**Рис. 8.** Гидроцилиндр с разными активными площадями поршней  
**Fig. 8.** Hydraulic cylinder with different active areas of pistons



**Рис. 9.** Гидроцилиндр с разными активными площадями поршней и компенсационным цилиндром  
**Fig. 9.** Hydraulic cylinder with different active areas of pistons and a compensation cylinder

Гидравлический стабилизатор с максимальной жесткостью, ограниченной только величиной объемной упругости жидкости, представлен на рис. 10.

Недостатком такой конструкции является сложность ее изготовления, а также отсутствие возможности получения чрезмерно большой жесткости.

Для связи двух гидроцилиндров двухстороннего действия, имеющих разные активные площади поршней, необходимо использовать компенсационные цилиндры с двумя независимыми объемами, обеспечивающими компенсацию объемов штоковой и бесштоковой полостей при перемещении поршня (рис. 11).

При возникновении крена вагона жидкость из бесштоковой полости основного гидро-

цилиндра выталкивается в штоковую полость противоположного цилиндра, при этом избыток жидкости поступает в полость компенсационного цилиндра, сжимая пружину. В данном случае сила предварительного сжатия пружины будет зависеть и от величины загрузки вагона, что автоматически обеспечит изменение величины сопротивления крена вагона.

### Заключение

Применение гидравлических систем стабилизации поперечной устойчивости вагонов позволит получить большую эффективность по сравнению с существующими (торсионными) – не только меньшую величину крена, но и крен необходимой величины, а также возможность автоматически изменять момент сопротивления

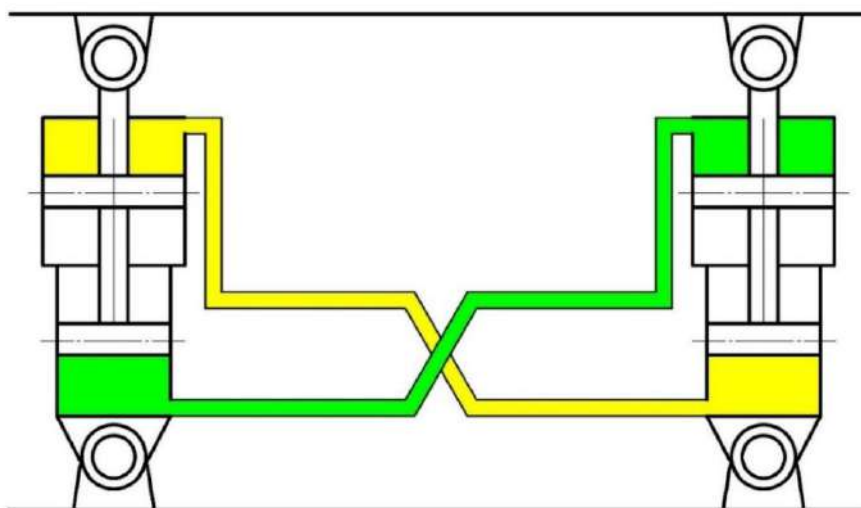


Рис. 10. Гидравлический стабилизатор максимальной жесткости  
Fig. 10. Hydraulic stabilizer of maximum rigidity

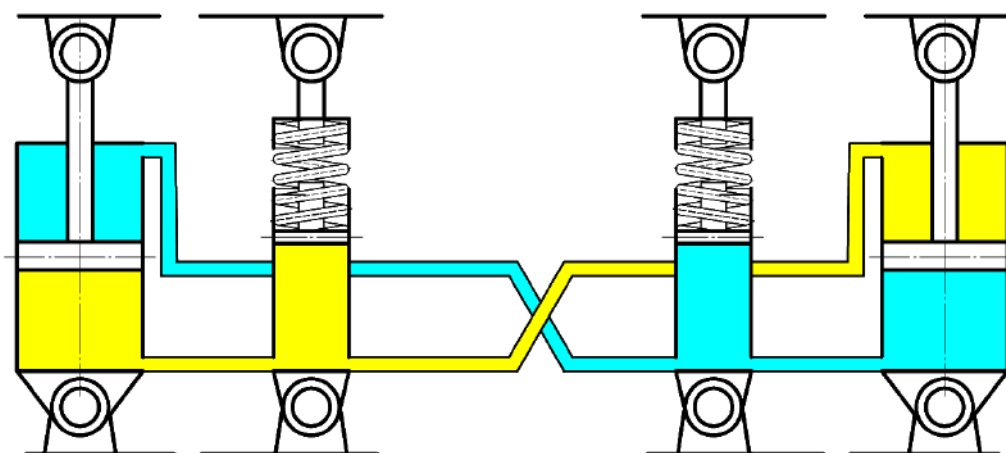


Рис. 11. Гидравлический стабилизатор с компенсационными цилиндрами  
Fig. 11. Hydraulic stabilizer with compensation cylinders

крену вагона в зависимости от его загрузки.

Дополнительные преимущества гидравлической стабилизации крена вагона создадут

предпосылки для ее применения на современных скоростных поездах, а также позволят повысить скорости движения грузовых поездов.

### Список литературы

1. Лукин В.В., Анисимов П.С., Федосеев Ю.П. Вагоны : общий курс. М. : Маршрут, 2004. 424 с.
2. Кузьмич Л.Д., Кост Е.Л., Завт С.И. Двухэтажные пассажирские вагоны : обзор. М. : НИИ Информтяжмаш, 1978. 36 с.
3. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
4. Никитин Г.С., Тинт Наинг Вин. Результаты динамического моделирования поперечной устойчивости малотоннажного фургона при криволинейном движении // Науч.-техн. вестн. Брянск. гос. ун-та. 2022. № 4. С. 322–329.
5. Кравец В.Н. Теория автомобиля. Нижний Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2013. 413 с.
6. Скоростной электропоезд ЭС1 «Ласточка» / А.Ю. Слизов, А.Г. Брагин, В.О. Иващенко и др. М. : Автограф, 2015. 236 с.
7. Лебедев В.А. Обоснование технических решений конструкции двухэтажного пассажирского вагона : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 178 с.
8. Оценка безопасности движения двухэтажного пассажирского вагона методом математического моделирования / В.А. Лебедев, В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин и др. // Вестн. Брянск. гос. техн. ун-та. 2014. № 4 (44). С. 24–27.
9. О принятии технических регламентов Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава», «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» и «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» : решение комиссии Таможенного союза № 710 от 15.07.2011 (в ред. 30.03.2023). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
10. Рожкова Е.А., Астафьева А.Н., Баранова Т.А. Анализ устойчивости вагона от опрокидывания при движении в кривых участках пути различного радиуса // Молодая наука Сибири. 2020. № 2 (8). С. 62–67.
11. Конторщиков С.В. Разработка стабилизатора поперечной устойчивости регулируемой жесткости для спортивного автомобиля класса «Формула студент» // Студенческие инженерные проекты : сб. материалов и докл. VI Всерос. форума. М., 2020. С. 75–81.
12. Пат. Рос. Федерация 2318678. Гидравлическая система стабилизации поперечной устойчивости транспортного средства / С.С. Якубов, Б.Е. Буртаков, Ф.З. Кабиров, и др. № 2006128530/11 ; заявл. 04.08.2006 ; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7. 7 с.
13. Пат. Рос. Федерация 2329159. Система стабилизации поперечной устойчивости транспортного средства / С.С. Якубов, Б.Е. Буртаков, Ф.З. Кабиров, и др. № 2006143514/11 ; заявл. 07.12.2006 ; опубл. 20.07.2008, Бюл. № 20. 6 с.
14. Попов А.В., Горбунов А.А. Выбор типа активной системы стабилизации поперечной устойчивости при проектировании автомобильных транспортных средств // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 8 (64). С. 72–78.
15. Невзоров Л.Л., Свиридов Е.В. Автоматическая система поперечной стабилизации военных колесных машин // Междунар. студенч. науч. вестник. 2016. № 3-2. С. 206–207.
16. Мехонин О.Н., Щеткин Р.В., Пугин К.Г. Оценка влияния смещения ребер опрокидывания при крене поддрессо-ренных элементов конструкции базовых шасси автомобильных кранов-манипуляторов на значение коэффициента грузовой устойчивости // Техника и технология транспорта. 2019. № S (13). URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-17TKR19.pdf> (Дата обращения 02.04.2024).
17. Лозин А.В., Павлов С.В., Семенов А.Г. Модернизация торсионного узла стабилизатора поперечной устойчивости кузова железнодорожного вагона // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения : сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф. СПб. ; Петергоф, 2022. С. 275–284.
18. Пат. Рос. Федерация 2807559. Гидравлический стабилизатор поперечной устойчивости железнодорожного вагона / О.Л. Маломыжев, Д.О. Маломыжев, С.В. Павлов и др. № 2023118971 ; заявл. 17.07.2023 ; опубл. 16.11.2023, Бюл. № 32. 14 с.
19. Шуханов С.Н., Маломыжев О.Л., Федотова Н.Е. Расчет расходов масла в агрегатах трансмиссий энергонасыщенных тракторов сельскохозяйственного назначения с принудительной системой смазки // Вестн. АПК Верхневолжья. 2017. № 2 (38). С. 75–78.

### References

1. Lukin V.V., Anisimov P.S., Fedoseev Yu.P. Vagony. Obshchii kurs [Wagons. General course]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 424 p.
2. Kuz'mich L.D., Kost E.L., Zavt S.I. Dvukhetazhnye passazhirskie vagony [Double-decker passenger wagons: an overview]. Moscow: Niinformtyazhmash Publ., 1978. 36 p.
3. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [Dynamics of the wagon]. Moscow: Transport Publ., 1991. 360 p.
4. Nikitin G.S., Tint Naing Vin. Rezul'taty dinamicheskogo modelirovaniya poperechnoi ustoichivosti malotonnazhnogo furgona pri krivolineinom dvizhenii [Results of dynamic modeling of the transverse stability of a low-tonnage van in curved motion]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University], 2022, no. 4, pp. 322–329.
5. Kravets V.N. Teoriya avtomobilya [Theory of the car]. Nizhnii Novgorod : NGTU im. R.E. Alekseeva Publ., 2013. 413 p.
6. Slizov A.Yu., Bragin A.G., Ivashchenko V.O., Shiryayev A.V., Matveev M.V. Skorostnoi elektropoezd ES1 «Lastochka» [High-speed electric train ES1 «Swallow»]. Moscow: Avtograf Publ., 2015. 236 p.
7. Lebedev V.A. Obosnovanie tekhnicheskikh reshenii konstruktssii dvukhetazhnogo passazhirskogo vagona [Substantiation of technical solutions for the design of a double-decker passenger wagon]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2017. 178 p.

8. Lebedev V.A., Kobishchanov V.V., Antipin D.Ya., Rasin D.Yu. Otsenka bezopasnosti dvizheniya dvukhetazhnogo passazhirskogo vagona metodom matematicheskogo modelirovaniya [Safety assessment of a double-decker passenger wagon by mathematical modeling]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2014, no. 4 (44), pp. 24–27.

9. Reshenie komissii Tamozhennogo soyuza № 710 ot 15.07.2011 g «O prinyatii tekhnicheskikh reglamentov Tamozhennogo soyuza «O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava», «O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta» i «O bezopasnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta» (red. 30.03.2023) [Decision of the Customs Union Commission No 710 dated July 15, 2011 «On the adoption of the technical regulations of the Customs Union «On the safety of railway rolling stock», «On the safety of high-speed rail transport» and «On the safety of railway transport infrastructure» (ed. March 30, 2023)].

10. Rozhkova E.A., Astaf'eva A.N., Baranova T.A. Analiz ustoichivosti vagona ot oprokidyvaniya pri dvizhenii v krivyykh uchastkakh puti razlichnogo radiusa razlichnogo radiusa [Analysis of the stability of the wagon from overturning when moving in curved sections of the track of different radii of different radii]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no. 2 (8), pp. 62–67.

11. Kontorshchikov S.V. Razrabotka stabilizatora poperechnoi ustoichivosti reguliruemoi zhestkosti dlya sportivnogo avtomobilya klassa «Formula student» [Development of a transverse stability stabilizer of adjustable stiffness for a sports car of the Formula Student class]. *Sbornik materialov i dokladov VI Vserossiiskogo foruma «Studencheskie inzhenernye proekty»* [Proceedings of the VI All-Russian Forum «Student Engineering projects»]. Moscow, 2020, pp. 75–81.

12. Yakubov S.S., Burtakov B.E., Kabirov F.Z., Belyaev A.R., Chagin V.G., Mardeev I.A., Savostin S.G., Arsen'ev M.V., Ryzhikov E.A., Konopko S.B. Patent RU 2318678 C1, 10.03.2008.

13. Yakubov S.S., Burtakov B.E., Kabirov F.Z., Belyaev A.R., Chagin V.G., Mardeev I.A., Savostin S.G., Arsen'ev M.V., Ryzhikov E.A. Patent RU 2329159 C1, 20.07.2008.

14. Popov A.V., Gorbunov A.A. Vybor tipa aktivnoi sistemy stabilizatsii poperechnoi ustoichivosti pri proektirovanii avtomobil'nykh transportnykh sredstv [Choosing the type of active lateral stability stabilization system in the design of motor vehicles]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific research and innovation], 2016, no. 8 (64), pp. 72–78.

15. Nevzorov L.L., Sviridov E.V. Avtomaticheskaya sistema poperechnoi stabilizatsii voennykh kolesnykh mashin [Automatic transverse stabilization system for military wheeled vehicles]. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik* [International Student Scientific Bulletin], 2016, no. 3-2, pp. 206–207.

16. Mekhonin O.N., Shchetkin R.V., Pugin K.G. Otsenka vliyaniya smeshcheniya reber oprokidyvaniya pri krene podressorenykh elementov konstruksii bazovykh shassi avtomobil'nykh kranov-manipulyatorov na znachenie koeffitsienta gruzovoi ustoichivosti [Assessment of the effect of the displacement of the tipping ribs during the roll of the sprung structural elements of the base chassis of automobile cranes on the value of the coefficient of load stability]. *Tekhnika i tekhnologiya transporta* [Equipment and technology of transport], 2019, no. S (13). Available at: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-17TKR19.pdf> (Accessed April 2, 2024).

17. Lozin A.V., Pavlov S.V., Semenov A.G. Modernizatsiya torsionnogo uzla stabilizatora poperechnoi ustoichivosti kuzova zheleznodorozhnogo vagona [Modernization of the torsion bar stabilizer of the transverse stability of the railway carriage body]. *Sbornik statei V Mezhdunarodnoi nauchnoi-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnaya zheleznaya doroga. Noveishie i perspektivnye sistemy obespecheniya dvizheniya poezdov. Problemy i resheniya»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Innovative railway. The latest and promising train traffic support systems. Problems and solutions»]. Saint Petersburg, Peterhof, 2022, pp. 275–284.

18. Malomyzhev O.L., Malomyzhev D.O., Pavlov S.V., Semenov A.G. Patent RU 2807559 C1, 17.07.2023.

19. Shukhanov S.N., Malomyzhev O.L., Fedotova N.E. Raschet raskhodov masla v agregatakh transmissii energonasyshchennykh traktorov sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya s prinuditel'noi sistemoi smazki [Calculation of oil consumption in transmission units of energy-saturated agricultural tractors with a forced lubrication system]. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya* [Bulletin of the agroindustrial complex of the Upper Volga region], 2017, no. 2 (38), pp. 75–78.

### Информация об авторах

**Маломыжев Олег Львович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olm@bk.ru.

**Маломыжев Дмитрий Олегович**, аспирант кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kbprf13@gmail.com.

**Павлов Сергей Викторович**, генеральный директор ООО «ПетроРемСтрой», г. Санкт-Петербург; e-mail: gd@spb-prs.ru.

**Семенов Александр Георгиевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент Высшей школы транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург; e-mail: agentnomer117@mail.ru.

### Information about the authors

**Oleg L. Malomyzhev**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olm@bk.ru.

**Dmitrii O. Malomyzhev**, Ph.D. Student of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kbprf13@gmail.com.

**Sergei V. Pavlov**, General Director of the PetroRemStroi LLC, Saint Petersburg; e-mail: gd@spb-prs.ru.

**Alexander G. Semenov**, Ph.D. in Engineering Science, Senior Researcher, Associate Professor of the Higher School of Transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg; e-mail: agentnomer117@mail.ru.

## Причины снижения маршрутизации порожних полувагонов на Восточном полигоне железных дорог и пути их устранения

В.В. Горшков<sup>1</sup>, В.А. Оленцевич<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Центр управления перевозками на Восточном полигоне – структурное подразделение центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск, Российская Федерация

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

✉olencevich\_va@mail.ru

### Резюме

В работе авторами проведен анализ технологии грузопотока на инфраструктурном комплексе Транссибирской магистрали, который показал, что барьерными местами при продвижении грузов к морским портам Дальнего Востока являются именно сортировочные комплексы. Большинство сортировочных станций не выполняют свои плановые показатели. Некоторые из них превратились в своего рода накопительные комплексы, в результате чего увеличивается время простоя транзитных вагонов, ограничиваются пропускные и перерабатывающие мощности Восточного полигона железных дорог и морских портов. Проведен анализ установленного порядка следования груженых вагонов под операции выгрузки на Дальневосточную железную дорогу. По итогам сформированы наиболее значимые причины снижения маршрутизации порожних полувагонов на Восточном полигоне железных дорог. Поставлен вопрос взаимодействия с клиентурой железнодорожного транспорта, представлены рекомендации по улучшению технологических процессов. Определено, что для разработки оптимального варианта работы Восточного полигона железных дорог без капитальных вложений в развитие инфраструктурного комплекса силами научных организаций ОАО «РЖД» необходимо произвести комплексный факторный анализ фактически реализуемой технологии организации выгрузки вагонов на путях необщего пользования, выявить причины недоработки со стороны ОАО «РЖД» и пользователей услугами перевозки и с использованием методов математического моделирования разработать предложения по устранению недостатков. Нужно также учитывать, что одним из целевых направлений оптимизации работы железных дорог в мире является надежность всего перевозочного процесса, которая в первую очередь зависит от развития сортировочных комплексов, их слаженной работы. Строительство на Восточном полигоне железных дорог новой сортировочной станции, основной задачей которой будет переработка нечетного вагонопотока, по мнению авторов, – стратегическая миссия ОАО «РЖД», реализация которой возможна на основе частного партнерства с вложением денежных средств операторов подвижного состава, грузоотправителей и грузополучателей.

### Ключевые слова

Восточный полигон железных дорог, пропускная и перерабатывающая способности, сортировочная станция, порожний вагонопоток, маршрутизация порожних полувагонов, консолидированные маршруты, пути необщего пользования, операторы подвижного состава

### Для цитирования

Горшков В.В. Причины снижения маршрутизации порожних полувагонов на Восточном полигоне железных дорог и пути их устранения / В.В. Горшков, В.А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 44–53. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).44-53.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 26.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 03.05.2024 г.; принята к публикации: 06.05.2024 г.

## Reasons for reducing the routing of empty gondola wagons at the Eastern Railway Polygon and ways to eliminate them

V.V. Gorshkov<sup>1</sup>, V.A. Olentsevich<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>The Transportation Management Center at the Eastern Landfill – the Structural Subdivision of the Central Directorate of Traffic Management – a Branch of JSC «Russian Railways», Irkutsk, the Russian Federation

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

✉olencevich\_va@mail.ru

### Abstract

In the work, the authors analyzed the technology of cargo flow on the infrastructure complex of the Trans-Siberian railway, which showed that sorting complexes are the barrier places when moving goods to the seaports of the Far East. Most marshalling yards are not meeting the requirements of their planned indicators. Some of them have turned into a kind of storage complexes, resulting in transit wagons downtime increase, with the throughput and processing capacities of the Eastern Landfill of railways and seaports

limited. The analysis of the established order of loaded wagons for unloading operations on the Far Eastern Railway is carried out. As a result, the most significant reasons for reducing the routing of empty gondola wagons at the Eastern Railway landfill were formed. The issue of interaction with the railway transport clientele is raised, recommendations for improving technological processes are presented. It is determined that in order to develop the optimal option for the operation of the Eastern Railway Landfill without capital investments in the development of the infrastructure complex by the scientific organizations of JSC «Russian Railways», it is necessary to make a comprehensive factor analysis of the actually implemented technology for the organization of unloading wagons on non-public tracks, to identify the causes of deficiencies on the part of JSC «Russian Railways» and users of transportation services and using mathematical modeling methods to develop proposals to eliminate shortcomings. It should also be borne in mind that one of the target areas for optimizing the work of railways in the world is the reliability of the entire transportation process, which primarily depends on the development of sorting complexes and their well-coordinated work. The construction of a new marshalling yard at the railway landfill, whose main task will be the processing of odd wagon traffic, according to the authors, is the strategic mission of JSC «Russian Railways», the implementation of which is possible on the basis of private partnership with the investment of funds from rolling stock operators, shippers and consignees.

### Keywords

Eastern railway Polygon, throughput and processing capacity, marshalling yard, empty wagon traffic, routing of empty gondola wagons, consolidated routes, non-public tracks, rolling stock operators

### For citation

Gorshkov V.V., Olentsevich V.A. Prichiny snizheniya marshrutizatsii porozhnykh poluvagonov na Vostochnom poligone zheleznykh dorog i puti ikh ustraneniya [Reasons for reducing the routing of empty gondola wagons at the Eastern Railway Polygon and ways to eliminate them]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 44–53. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).44-53.

### Article Info

Received: April 26, 2024; Revised: May 3, 2024; Accepted: May 6, 2024.

### Введение

Произошедшие в Российской Федерации изменения в структуре рынка грузовых перевозок привели к увеличению доли частных операторских компаний в сегменте грузовых железнодорожных перевозок. В настоящее время доля вагонного парка, эксплуатируемого операторскими компаниями, составляет более 80 % [1, 2].

Объекты железнодорожного инфраструктурного комплекса, деятельность которых направлена на обеспечение бесперебойного перевозочного процесса, органично интегрированы в единую транспортную систему Российской Федерации. Существующие мощности объектов инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог не обладают возможностями для реализации процессов специализации маршрутов пропуска тяжелых грузовых поездов, поездов повышенной длины, повышенной скорости, что отрицательно влияет на экономические и финансовые показатели ОАО «РЖД» [1, 2].

Проведенный анализ показал, что в настоящее время отсутствует возможность обеспечения эффективности перевозок массовых грузов, не в полной мере реализуется потребность российских предприятий и добывающих отраслей в качественных и скоростных

перевозках по инфраструктурному комплексу Восточного полигона железных дорог. Данные показатели как раз и позволяют дать оценку устойчивости и стабильности работы железнодорожной отрасли [3, 4].

Около 95 % перевозимых грузов в стране приходится на железнодорожный транспорт, а с учетом того, что сегодня крупнейшие проекты государства направлены на эффективное освоение регионов Сибири и Дальнего Востока, долгосрочные планы развития Восточного полигона железных дорог не вызывают сомнения. Для основной доли крупнейших грузоотправителей, перевозящих такие массовые грузы, как уголь, черная и цветная руда, лес и лесоматериалы, строительные материалы и прочие, перевозка с использованием железнодорожного транспорта служит единственной альтернативой и целесообразна экономически, поскольку в полной мере отражается на себестоимости готовой продукции [1, 5]. Именно значительный прирост объемов грузоперевозок на восточные морские и сухопутные порты дает возможность данному транспортному коридору получить статус международного [1]. В результате модернизации существующей и создания новой железнодорожной транспортной инфраструктуры на Восточном полигоне железных дорог прогнозируется прирост уровня пропуск-

ных и провозных мощностей. Мероприятия позволят обеспечить увеличение размеров транзитных грузопотоков более чем в 3 раза, а также сократить время доставки грузов.

В связи с ростом грузопотока на восточном направлении функционирования ОАО «РЖД», Транссибирская магистраль испытывает значительное увеличение нагрузки на сортировочные устройства. На инфраструктурном комплексе Восточного полигона железных дорог имеется дефицит пропускных мощностей по причине наращивания объемов сортировочной работы, что вызвано в первую очередь необходимостью переработки порожнего вагонопотока, принадлежащего разливным операторам подвижного состава. Проведенный анализ показал, что значительная часть крупных сортировочных узлов Восточного полигона функционирует на пределе пропускных и перерабатывающих способностей.

В связи с изложенным цель данной статьи заключается в выявлении и обосновании причин снижения маршрутизации порожних полувагонов на Восточном полигоне железных дорог, а также внесение предложений для решения данной проблемы.

## Материалы и методы исследования

В настоящее время железнодорожный транспортный комплекс играет ключевую роль в экономическом и политическом становлении мировой транспортной системы, обеспечивая эффективное перемещение грузов и пассажиров. Одним из наиболее загруженных направлений российской транспортной системы является Восточный полигон железных дорог, который является важнейшей стратегической артерией для связи экономических партнеров запада и востока и в последние годы обладает высокой явно выраженной интенсивностью грузоперевозок.

Глобальные изменения в распределении грузовой базы государства, особенно ее разворот на восток, ставят перед данным транспортным направлением как вызовы, так и перспективы для дальнейшего успешного развития ОАО «РЖД», а в особенности ее структурных подразделений, расположенных территориально в зоне Сибири и Дальнего Востока: Красноярская, Восточно-Сибирская, Забайкальская, Дальневосточная железные дороги [1, 6]. Уровень пропускных способностей участков Восточного полигона железных дорог представлен на рис.



Схема размеров пропускных способностей участков Восточного полигона железных дорог  
 Scheme of the sizes of the throughput capacities of the sections of the Eastern railway polygon

В условиях, когда речь идет о скорейшей выработке технологических мер и разработке управленческих решений, способствующих повышению эффективности действующего инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог, важно учитывать ряд ключевых составляющих элементов.

Данные элементы могут варьироваться в зависимости от конкретных условий и перспективных задач, но в целом возможно выделить несколько основных аспектов.

1. Модернизация инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог:

– обновление и модернизация железнодорожных путей, станций, системы энергообеспечения и прочих элементов инфраструктуры, непосредственно обеспечивающих бесперебойность перевозочного процесса и возможности для беспрепятственного пропуска перспективного грузопотока, с учетом развития месторождений Сибири и Дальнего Востока;

– внедрение современных цифровых технологий и материалов, способствующих повышению уровня пропускных и перерабатывающих мощностей объектов инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог, снижению степени износа основных фондов ОАО «РЖД».

2. Автоматизация и цифровизация производственных процессов:

– внедрение и тиражирование систем, комплексов по автоматизации процессов управления движением поездов с целью оптимизации технологических процессов работы, сокращения времени на выполнение технологических операций, уменьшения количества и продолжительности задержек подвижного состава, повышения уровня производительности использования основных производственных ресурсов Восточного полигона железных дорог;

– внедрение цифровых технологий и контролирующих процессов для проведения регулярного мониторинга и управления состоянием объектов инфраструктурного комплекса, предотвращение и снижение степени аварийности, повышения суммарной эффективности движения поездов.

3. Энергосбережение и устойчивость функционирования объектов инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог:

– разработка и внедрение энергоэффек-

тивных технологий, например использование энергосберегающих систем освещения, управление энергопотреблением и т.д.;

– внедрение устойчивых практик в строительстве и эксплуатации инфраструктуры полигона с целью понижения негативного воздействия на окружающую среду, сокращения степени неблагоприятного воздействия внешних факторов, расширение программы бережливого производства и экономии всех видов ресурсов.

4. Обучение персонала и формирование кадрового потенциала:

– подготовка высококвалифицированного персонала для работы с новыми технологиями, цифровыми форматами;

– внедрение систем обучения и повышения квалификации для обеспечения безопасности и эффективности производства железнодорожных операций;

– формирование понимания преданности компании.

5. Обеспечение высокого уровня безопасности движения поездов и формирование общесетевого рискориентированного подхода:

– разработка и внедрение мер по обеспечению безопасности движения поездов и технической эксплуатации инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог;

– модернизация системы мониторинга и предотвращения чрезвычайных ситуаций;

– формирование общесетевого рискориентированного подхода, способствующего минимизации всех видов рисков в работе объектов инфраструктурного комплекса с целью снижения уровня непроизводительных расходов и исключения роста себестоимости перевозочного процесса.

6. Стандартизация и согласованность производственных и технологических процессов:

– обеспечение соответствия инфраструктурного комплекса существующим стандартам и требованиям безопасности перевозочного процесса и эффективности производственной деятельности;

– согласование действий с прочими транспортными комплексами и системами с целью обеспечения общей эффективности транспортной системы России, повышения уровня клиентоориентированности и конкурентоспособности на международном рынке [6–10].

Представленные ключевые элементы могут служить основой для разработки комплекс-



ной стратегии повышения эффективности функционирования инфраструктурного комплекса Восточного полигона железных дорог с учетом технологических, экологических, экономических и социальных аспектов. В рамках данной концепции особое внимание необходимо уделить работе и оптимальному развитию сортировочных устройств, от эффективности деятельности которых сегодня во многом зависит обеспечение степени маршрутизации на Восточном полигоне железных дорог как одного из способов для обеспечения возможности пропуска прогнозного грузопотока на восточном направлении.

Существующие ныне сортировочные устройства ОАО «РЖД» были запроектированы и построены в XX в. под руководством Министерства путей сообщения СССР, которое являлось единым государственным общесетевым оператором. В данный период организация и управление движением порожних вагонов формировалось по принципу единого парка, учитывало возможности минимального порожнего пробега подвижного состава и размеров сортировочной работы. Целью сортировочных устройств железнодорожных станций всегда было и останется обеспечение оптимального перевозочного процесса и подбор по назначениям груженых вагонов в направлении станций выгрузки [3, 11, 12].

Маршрутизация порожних вагонопотоков в значительной мере приводит к уменьшению количества переработок вагонов в пути следования, сокращению времени простоя вагонов на сортировочных станциях, способствует увеличению длины грузового поезда, что позволяет нарастить скорость движения, улучшить качественные показатели работы подвижного состава и максимально обеспечить потребности в погрузке. Учет внутрисуточной закономерности выгрузки, особенностей процесса накопления составов из порожних вагонов, более высоких допустимых скоростей движения поездов из порожних вагонов и т.д. позволяет существенно увеличить уровень маршрутизации порожних вагонопотоков.

Особенностью формирования составов из порожних вагонов является изъятие в процессе накопления определенной доли вагонного парка с целью производства погрузки на станциях и прилегающих железнодорожных линиях. Как следствие, с грузовых станций данного участка

отправляется меньшее количество порожних вагонов, чем выгружается, а на сортировочных станциях в процессе накопления участвует меньший объем вагонного парка, чем общий порожний вагонопоток, что способствует простоту пропускных и перерабатывающих мощностей данного инфраструктурного комплекса, повышает производительность использования подвижного состава, сокращает оборот вагона, приводит к снижению затрат на производство одного и того же объема грузопотока.

Проведем анализ данных особенностей и возможностей их использования в оперативном управлении движением поездов с целью пророста уровня маршрутизации порожних вагонопотоков на Восточном полигоне железных дорог.

Процент маршрутизации в направлении станций выгрузки Дальневосточной железной дороги по итогам работы отрасли за 2023 г. составил более 80 %. Согласно пробегу порожнего полувагона как основного рода подвижного состава, передаваемого в порожнем состоянии с Дальневосточной железной дороги, в марте 2024 г. процент маршрутизации составил 39. При этом по отправлению со станций выгрузки Дальневосточной железной дороги процент маршрутизации равнялся 20 [1, 13].

На сегодня установлен следующий порядок следования груженых вагонов под операции выгрузки на Дальневосточную железную дорогу:

– составы из групп вагонов различных операторов (сборные или сборно-участковые грузовые поезда) со станций, имеющих объемы погрузки, не позволяющие обеспечить формирование маршрутов (в дальнейшем по ст. Хабаровск-2), планируются маршруты из вагонов, следующих в назначение основных грузополучателей, и сборные, сборно-участковые поезда;

– консолидированные маршруты, состоящие из вагонов различных операторов, следующие в одно назначение;

– маршруты, состоящие из вагонов одного оператора подвижного состава, следующие в одно назначение [1, 14–18].

Проведенный авторами анализ позволил выявить следующие причины снижения уровня маршрутизации порожних полувагонов с железнодорожных станций выгрузки грузов.

*1. Отсутствие консолидации операторов подвижного состава при возврате порож-*

них вагонов к местам погрузки.

После прибытия маршрутов, консолидированных из вагонов различных операторов на станции выгрузки, в обратном направлении, после окончания выгрузочных операций, вагоны заадресовываются на различные станции погрузки.

*2. Смешивание групп вагонов различных операторов подвижного состава на путях необщего пользования при использовании вагонопрокидывателей.*

Со станций, осуществляющих выгрузку полувагонов на эстакадах, возврат порожних полувагонов осуществляется в основном маршрутизировано.

*3. Выделение из выгруженных вагонов операторов подвижного состава инновационных вагонов с повышенной грузоподъемностью и вагонов с обычной грузоподъемностью с последующим направлением на различные станции погрузки.*

В основном инновационные вагоны повышенной грузоподъемности направляются на станции погрузки Западно-Сибирской железной дороги и ст. Челутай Восточно-Сибирской железной дороги, вагоны с обычной грузоподъемностью – в направлении станции погрузки Дальневосточной железной дороги и станций погрузки Восточного полигона.

*4. Выделение из выгруженных вагонов операторов подвижного состава вагонов с истекающим сроком депоовского ремонта с последующим направлением их в назначение вагоноремонтных депо.*

Основной причиной смешивания групп вагонов различных операторов подвижного состава на путях необщего пользования является поточный принцип организации выгрузки и накопление вагонов после выгрузки на путях, не специализированных по операторам подвижного состава. Согласно установленной технологии работы при выгрузке вагонов с использованием нескольких параллельно расположенных вагонопрокидывателей подача вагонов должна осуществляться параллельно по нескольким путям надвига с дальнейшим последовательным выводом выгруженной группы вагонов с каждого вагонопрокидывателя на накопительный путь. Емкость вагонопрокидывателя составляет два-три вагона [19].

Необходимо отметить, что компаниями, осуществляющими выгрузку вагонов в морских

портах Дальнего Востока, заявлена перерабатывающая способность, в разы превышающая возможности компании ОАО «РЖД» по подводу груза к припортовым станциям, при этом не учитывается, что поточный принцип организации выгрузки на путях необщего пользования предполагает переформирование составов, состоящих из порожних полувагонов на припортовых и сортировочных станциях Дальневосточной железной дороги и Восточного полигона [10, 11, 20].

Учитывая, что припортовые станции не имеют достаточных сортировочных мощностей и путевого развития, предназначенного для переформирования составов, основная нагрузка в подборе маршрутов по операторам ложится на станции Хабаровск-2 (при наличии в составе вагонов, направляемых под погрузку на Дальневосточную железную дорогу), Белогорск, Иркутск-Сортировочный, Тайшет, Красноярск-Восточный и сортировочные станции Западно-Сибирской железной дороги (в зависимости от назначения следования вагонов), что ведет к снижению маршрутной скорости составов, следующих под погрузку, завышению оборота вагонов операторов и, как уже было сказано, к излишней нагрузке по переформированию составов на сортировочных станциях.

Уже сейчас по ст. Хабаровск-2 объем переработки вагонов на нечетной сортировочной системе практически приближен к проектным мощностям.

При сохранении технологии работы путей необщего пользования и технологии переформирования составов с подбором по операторам на сортировочных станциях в условиях увеличения объемов перевозок в направлении Дальнего Востока дефицит перерабатывающей способности нечетной сортировочной системы ст. Хабаровск-2 в 2030 г. составит предположительно 23 поезда в сутки (1 600 вагонов), в 2035 г. – 32 поезда в сутки (2 300 вагонов) [12, 13].

## **Результаты исследования**

Таким образом, уже сейчас необходимо решать вопрос по изменению технологии организации возврата порожних вагонов с мест выгрузки, так как в дальнейшем ситуация может приобрести необратимый характер и привести к массовым задержкам поездопотока на Дальневосточной железной дороге.

Как показывает практика, задержка поездопотока в нечетном направлении ведет к сокращению движения и в четном направлении, так как обеспечение графика движения пассажирских и пригородных поездов, являющегося ключевым показателем эффективности работы железных дорог, потребует организации их пропуска по «неправильному» пути.

Возможными способами решения данной ситуации, являются:

1. *Изменение технологии выгрузки на путях необщего пользования.*

При выгрузке маршрута, состоящего из вагонов одного оператора, осуществлять разделение состава на несколько частей с дальнейшей организацией выгрузки на нескольких вагоноопрокидывателях одного оператора. При реализации данной технологии потребуются перерасчет перерабатывающей способности путей необщего пользования, так как применение технологии повлечет проведение дополнительных операций по разъединению составов и задержке надвига вагонов до окончания выгрузки вагонов одного оператора.

2. *Формирование оборотных маршрутов консолидированных из вагонов различных операторов, курсирующих на постоянной основе между станциями погрузки и выгрузки.*

3. *Формирование мотивационных и стимулирующих законодательных мер по обеспечению выдачи с путей необщего пользования организованных порожних маршрутов по принципу «принял маршрут – выдал маршрут» с наложением мер воздействия при нарушении принципов маршрутизации.*

4. *Специализация накопительных путей на инфраструктуре необщего пользования по операторам подвижного состава.*

При данной технологии возможно потребуются развитие путей необщего пользования, определение размеров инвестиционных вложений в развитие и источников финансирования. Кроме того, необходимо будет провести исследование наличия достаточных площадей для расширения.

5. *Увеличение сортировочных мощностей на путях необщего пользования для реформирования составов после выгрузки.*

В данном случае также требуется развитие путей необщего пользования, определение размеров инвестиционных вложений и источников финансирования, наличия площадей, до-

статочных для расширения.

6. *Увеличение сортировочных мощностей припортовых станций.*

Требуется исследование возможности развития в условиях городской инфраструктуры, достаточности сортировочных мощностей одной станции для увеличения маршрутизации по всей Дальневосточной железной дороге, а также размеров инвестиционных вложений и источников финансирования;

7. *Развитие нечетной сортировочной системы ст. Хабаровск-2.*

Требуется исследование возможности развития в условиях городской инфраструктуры, размеров инвестиционных вложений и источников финансирования.

8. *Строительство на Восточном полигоне железных дорог новой сортировочной станции для переработки нечетного вагонопотока.*

Строительство сортировочных станций при стандартных условиях и профиците пропускных способностей обычно ведет к замедлению вагонопотока и увеличению оборота вагонов, однако учитывая, что оборот вагона уже замедлен и вагоны в цикле от погрузки до погрузки следуют с переработкой по нескольким сортировочным станциям, строительство новой сортировочной станции для переработки нечетного порожнего вагонопотока может обеспечить сокращение оборота вагонов и увеличение маршрутной скорости операторов подвижного состава [16–19, 21].

## Заключение

С целью определения оптимального варианта дальнейшего развития Восточного полигона железных дорог силами научных организаций ОАО «РЖД» необходимо провести анализ фактически реализуемой технологии организации выгрузки вагонов на путях необщего пользования в сравнении с технологией, утвержденной нормативной документацией, определить причины и возможные пути устранения расхождений без вложений в развитие инфраструктуры.

По итогам анализа становится возможным комплексное моделирование программы повышения маршрутизации порожних вагонов с Дальневосточной железной дороги, учитывающей все предложенные варианты.

Мероприятия могут быть реализованы на основе частного партнерства с вложением в развитие сортировочных мощностей денежных средств операторов подвижного состава, грузо-отправителей и грузополучателей, так как при этом обеспечивается сокращение переработок в пути следования, ускорение оборота вагонов и сроков доставки груза.

### Список литературы

1. Российские железные дороги : сайт / ОАО «РЖД». URL : <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 23.04.2024).
2. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-правов. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
3. Ко Ко Лвин. Закономерности и факторы комплексного развития транспортной системы Мьянмы : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 153 с.
4. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Котельников С.С. Развитие методов оптимизации технических и технологических параметров железнодорожных станций. М. : Ай Пи Ар Медиа, 2020. 107 с.
5. Типовой технологический процесс работы сортировочной станции. М. : МПС РФ, 2003. 178 с.
6. 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. 20.02.2024). Доступ из справ.-правов. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
7. Оленевич В.А., Гозбенко В.Е. Задачи приспособления транспортной инфраструктуры к новым технологиям // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 189–190.
8. Семенцова Т.М., Степанова И.А., Силичева Г.В. Проблемы повышения эффективности работы сортировочных станций // Молодая наука Сибири. 2020. № 1(7). С. 71–76.
9. Olentsevich, V.A., Belogolov, Y.I., Kramynina, G.N. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system // International conference on digital solutions for automotive industry, roadway maintenance and traffic control, DS ART 2019. Cholpon-Ata, 2019. Vol. 832. DOI:10.1088/1757-899X/832/1/012038.
10. Король Р.Г., Нечипорук М.В. Логистические решения по регулированию порожнего вагонопотока на Восточном полигоне железных дорог // Известия Транссиба. 2020. № 3 (43). С. 107–119.
11. Каимов Е.В., Оленевич В.А., Максимова Р.В. Актуальность вопросов перераспределения технических мощностей Восточного полигона железных дорог // Актуальные проблемы транспорта в XXI веке : тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2023. С. 185–188.
12. Об утверждении методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования : приказ Минтранса России №266 от 18.07.2018. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
13. Александров А.Э. Расчет и оптимизация транспортных систем с использованием моделей : теоретические основы, методология : автореф. дис. ... докт. техн. наук. Екатеринбург, 2008. 49 с.
14. Король Р.Г., Балалаев А.С. Имитационное моделирование работы припортовой железнодорожной станции с вероятностно-статистическим подходом к изменению параметров поступающего вагонопотока // Транспорт Урала. 2014. № 3 (42). С. 53–57.
15. Ларина И.В., Ларин А.Н. Управление качеством работы транспортного узла с учетом эксплуатационных характеристик // Известия Транссиба. 2019. № 1 (37). С. 130–141.
16. Бушуев С.В., Ковалев И.А. Восстановление движения после отказов с применением виртуальной сцепки поездов // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10. № 1. С. 64–73.
17. Ермакова Д.М., Степанова А.Р., Файзрахманова Е.В. Транспортный аспект смещения фокуса международных торговых связей России // Актуальные вопросы устойчивого развития современного общества и экономики : сб. науч. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. Курск, 2024. Т. 1. С. 181–185.
18. Ермакова Д.М., Власова Н.В. Перспективы развития инфраструктурного комплекса восточного полигона железных дорог России с целью экспорта российского угля // Молодая наука Сибири. 2024. № 1 (23). С. 35–42. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1569/1109> (дата обращения 20.04.2024).
19. Макаренко Ю.Н., Пузина Е.Ю. Направления модернизации тяговых подстанций при увеличении объема перевозок по Восточному полигону // Молодая наука Сибири. 2024. № 1 (23). С. 117–126. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1481/1036> (дата обращения 18.04.2024).
20. Фокеев А.Б. Разработка алгоритмов оптимизации маршрутов для повышения доходов железнодорожных операторов // Russian Economic Bulletin. 2024. Т. 7. № 3. С. 359–364.
21. Урина У.С., Тарасова О.В. Оценка вариантов отраслевой структуры перевозок на восток по Восточному полигону // Огни магистрали : исторический опыт и стратегии развития регионов Сибири и Дальнего Востока : сб. науч. тр. по материалам всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Улан-Удэ, 2024. С. 368–374.

### References

1. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed April 23, 2024).

2. 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 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].
3. Ko Ko Lvin. Zakonomernosti i faktory kompleksnogo razvitiya transportnoi sistemy M'yanmy [Patterns and factors of the integrated development of Myanmar's transport system]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2018. 153 p.
4. Ivankova L.N., Ivankov A.N., Kotel'nikov S.S. Razvitie metodov optimizatsii tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov zheleznodorozhnykh stantsii [Development of methods for optimizing technical and technological parameters of railway stations]. Moscow: Ai Pi Ar Media Publ., 2020. 107 p.
5. Tipovoi tekhnologicheskii protsess raboty sortirovochnoi stantsii [Typical technological process of a marshalling yard]. Moscow: MPS RF Publ., 2003. 178 p.
6. 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. 20.02.2024) [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. February 20, 2024)].
7. Olentsevich V.A., Gozbenko V.E. Zadachi prispособleniya transportnoi infrastruktury k novym tekhnologiyam [The tasks of adapting transport infrastructure to new technologies]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2021, no. 8, pp. 189–190.
8. Sementsova T.M., Stepanova I.A., Silicheva G.V. Problemy povysheniya effektivnosti raboty sortirovochnykh stantsii [Problems of increasing the efficiency of marshalling yards]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young Science of Siberia], 2020, no. 1 (7), pp. 71–76.
9. Olentsevich, V.A., Belogolov, Y.I., Kramynina, G.N. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system. *2019 International conference on digital solutions for automotive industry, roadway maintenance and traffic control, DS ART 2019*. Cholpon-Ata, 2019, vol. 832. DOI:10.1088/1757-899X/832/1/012038.
10. Korol' R.G., Nechiporuk M.V. Logisticheskie resheniya po regulirovaniyu porozhnego vagonopotoka na Vostochnom poligone zheleznykh dorog [Logistic solutions for regulating empty carriage traffic at the Eastern polygon of railways]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2020, no. 3 (43), pp. 107–119.
11. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Maksimova R.V. Aktual'nost' voprosov pereraspredeleniya tekhnicheskikh moshchnostei Vostochnogo poligona zheleznykh dorog [Relevance of issues of redistribution of technical capacities of the Eastern polygon of railways]. *Trudy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy transporta v XXI veke»* [Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Actual problems of transport in the XXI century»]. Novokuznetsk, 2023, pp. 185–188.
12. Prikaz Mintransa Rossii №266 ot 18.07.2018 «Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya propusknoi i provoznoi sposobnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol'zovaniya» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated July 18, 2018 No 266 «On approval of the methodology for determining the capacity and carrying capacity of the infrastructure of public railway transport»].
13. Alexandrov A.E. Raschet i optimizatsiya transportnykh sistem s ispol'zovaniem modelei: teoreticheskie osnovy, metodologiya [Calculation and optimization of transport systems using models: theoretical foundations, methodology]. Doctor's theses. Ekaterinburg, 2008. 49 p.
14. Korol' R.G., Balalaev A.S. Imitatsionnoe modelirovanie raboty priportovoi zheleznodorozhnoi stantsii s veroyatnostno-statisticheskim podkhodom k izmeneniyu parametrov postupayushchego vagonopotoka [Simulation modeling of the operation of a portside railway station with a probabilistic and statistical approach to changing the parameters of incoming carriage traffic]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2014, no. 3 (42), pp. 53–57.
15. Larina I.V., Larin A.N. Upravlenie kachestvom raboty transportnogo uzla s uchetom ekspluatatsionnykh kharakteristik [Quality management of the transport hub, taking into account operational characteristics]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2019, no. 1 (37), pp. 130–141.
16. Bushuev S.V., Kovalev I.A. Vosstanovlenie dvizheniya posle otkazov s primeneniem virtual'noi stepki poezdov [Restoration of movement after failures using virtual coupling of trains]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2024, vol. 10, no. 1, pp. 64–73.
17. Ermakova D.M., Stepanova A.R., Faizrahmanova E.V. Transportnyi aspekt smeshcheniya fokusa mezhdunarodnykh torgovykh svyazei Rossii [Transport aspect of shifting the focus of Russia's international trade relations]. *Sbornik nauchnykh statei III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy ustoychivogo razvitiya sovremennogo obshchestva i ekonomiki»* [Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Topical issues of sustainable development of modern society and the economy»]. Kursk, 2024, vol. 1, pp. 181–185.
18. Ermakova D.M., Vlasova N.V. Perspektivy razvitiya infrastruktornogo kompleksa vostochnogo poligona zheleznykh dorog Rossii s tsel'yu eksporta rossiiskogo uglya [Prospects for the development of the infrastructural complex of the eastern polygon of the railways of Russia for the purpose of exporting Russian coal]. *Molodaya Nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2024, no. 1 (23), pp. 35–42.
19. Makarenko Yu.N., Puzina E.Yu. Napravleniya modernizatsii tyagovykh podstantsii pri uvelichenii ob'ema perevozok po Vostochnomu poligonu [Directions of modernization of traction substations with an increase in the volume of traffic through the Eastern polygon]. *Molodaya Nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2024, no. 1 (23), pp. 117–126.

20. Fokeev A.B. Razrabotka algoritmov optimizatsii marshrutov dlya povysheniya dokhodov zheleznodorozhnykh operatorov [Development of algorithms for optimizing routes to increase the incomes of railway operators]. *Russian Economic Bulletin*, 2024, vol. 7, no. 3, pp. 359–364.

21. Urina U.S., Tarasova O.V. Otsenka variantov otraslevoi struktury perevozok na vostok po Vostochnomu poligonu [Assessment of options for the sectoral structure of transportation to the east along the Eastern polygon]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (k 50-letiyu nachala stroitel'stva Baikalo-Amurskoi zheleznodorozhnoi magistrali) «Ogni magistrali : istoricheskii opyt i strategii razvitiya regionov Sibiri i Dal'nego Vostoka»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation (on the 50th anniversary of the beginning of the construction of the Baikal-Amur railway) «Highway Lights: historical experience and strategies for the development of the regions of Siberia and the Far East»]. Ulan-Ude, 2024, pp. 368–374.

#### Информация об авторах

**Горшков Василий Васильевич**, заместитель начальника Центра управления перевозками на Восточном полигоне – структурного подразделения Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД», г. Иркутск; e-mail: vg17081972@mail.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.

#### Information about the authors

**Vasilii V. Gorshkov**, Deputy Head of the Transportation Management Center at the Eastern Landfill of Structural Division of the Central Directorate of Traffic Management – a Branch of JSC «Russian Railways», Irkutsk; e-mail: vg17081972@mail.ru.

**Victoriya A. Olentsevich**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olencevich\_va@mail.ru.

## **Анализ объемных и качественных показателей работы Восточно-Сибирского территориального Центра фирменного транспортного обслуживания с целью совершенствования качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта**

**Н.В. Власова**✉, **В.С. Брытков**

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

✉natalya.vlasova.76@list.ru

### **Резюме**

Авторами проведен факторный анализ объемных и качественных показателей функционирования территориального Центра фирменного транспортного обслуживания ОАО «РЖД» с целью улучшения качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта в новых экономических условиях. Рассмотрены основные базовые принципы корпоративной системы организации внутреннего и внешнего клиентоориентирования. В настоящее время доктрина в сфере предоставления качественной услуги заключается в удовлетворенности потребителей транспортных услуг в грузовых перевозках, совершенствовании эффективности деятельности за счет сбалансированности коммерческой и клиентоориентированной политики в данной области, повышения качества транспортно-экспедиционного обслуживания с учетом предпосылок создания особых требований к стабильности, эффективности и безопасности организации перевозочного процесса. В числе приоритетных задач ОАО «РЖД» – повышение объемов грузов, перевозимых по железной дороге и, как следствие, рост доходов компании. Для осуществления этой цели требуется, в первую очередь, комплексное развитие транспортной инфраструктуры и улучшение качества работы обслуживающего сервиса. Достичь этого можно за счет внедрения передовых технологий, общей оптимизации перевозочного процесса, расширения списка предоставляемых услуг, модернизации 3PL- и 4PL-услуг, создания оптимальных сквозных транспортно-логистических услуг «от двери до двери», предоставления экономически обоснованных продуктов в формате «единого окна», интеграции глобальных цепей поставок, создания IT-платформы и формирования компетенций для подготовки к выходу продуктов в спектр 5PL-услуг. Значимость включения клиентоориентированного подхода в процессы компаний цифрового маркетинга напрямую связана с изменением роли клиента в парадигме реализации бизнес-услуг на уровне создания ценностного предложения, что улучшит систему сбыта услуг, увеличит доходы предприятия, обеспечит государственные и социальные задачи. Таким образом, для оценки клиентоориентированности транспортной компании может быть использован широкий спектр методов, которые предполагают расчет количественных и качественных показателей, а также позволяют характеризовать результативность выстраивания долгосрочных отношений с клиентами с разных сторон на основе внедрения сквозной системы управления (планирования) в сфере мультимодальных перевозок для формирования гарантированной грузовой базы и проактивного планирования инфраструктурных мероприятий, обеспечивающих потребности транспортно-логистических услуг.

### **Ключевые слова**

клиентоориентированный подход, оценка качества предоставления услуг, территориальный Центр фирменного транспортного обслуживания ОАО «РЖД», анализ показателей работы, клиент, компания, транспортные услуги

### **Для цитирования**

Власова Н.В. Анализ объемных и качественных показателей работы Восточно-Сибирского территориального Центра фирменного транспортного обслуживания с целью совершенствования качества предоставления услуг клиентам железнодорожного транспорта / Н.В. Власова, В.С. Брытков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 54–65. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).54-65.

### **Информация о статье**

поступила в редакцию: 07.05.2024 г.; поступила после рецензирования: 20.05.2024 г.; принята к публикации: 21.05.2024 г.

## **Analysis of volume and quality indicators of the East Siberian territorial Center of corporate transport services in order to improve the quality of services provided to railway transport customers**

**N.V. Vlasova**✉, **V.S. Brytkov**

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

✉natalya.vlasova.76@list.ru

**Abstract**

The authors carried out a factor analysis of the volume and quality indicators of the functioning of the territorial Center of brand-ed transport services of JSC «Russian Railways» in order to improve the quality of providing services to railway transport customers in new economic conditions. The main basic principles of the corporate system of organizing the internal and external customer orientation are considered. Currently, the doctrine in the field of providing high-quality services is to satisfy consumers of transport services in freight transportation, improve business efficiency by balancing commercial and customer-oriented policies in this area, improve the quality of freight forwarding services, taking into account the prerequisites for creating special requirements for the stability, efficiency and safety of the organization of the transportation process. Among the priorities of JSC «Russian Railways» is increasing the volume of goods transported by rail and, as a result, the increase of the company's revenues. To achieve this goal, first of all, the comprehensive development of transport infrastructure and improvement of the service quality are required. This can be achieved through the introduction of advanced technologies, the overall optimization of the transportation process, the expansion of the list of services provided, the modernization of 3PL and 4PL services, the creation of optimal end-to-end door-to-door transport and logistics services, the provision of economically sound products in a single window format, the integration of global supply chains, the creation of IT is a springboard and the formation of competencies to prepare for the launch of products in the range of 5PL services. The need to include a customer-oriented approach in the processes of digital marketing companies is directly related to the change in the role of the client in the paradigm of business services implementation at the level of creating a value proposition, which will improve the system of service delivery, increase enterprise revenues, and ensure of the fulfilment of government and social objectives. Thus, to assess the customer orientation of a transport company, a wide range of methods can be used, which involve the calculation of quantitative and qualitative indicators, and also allow to characterize the effectiveness of building long-term relationships with customers from different sides based on the introduction of an end-to-end management (planning) system in the field of multimodal transportation to form a guaranteed cargo base and proactive planning of infrastructure measures that meet the needs of transport and logistics services.

**Keywords**

client-oriented approach, assessment of the quality of service provision, territorial Center of corporate transport services of JSC «Russian Railways», analysis of performance indicators, client, company, transport services

**For citation**

Vlasova N.V., Brytkov V.S. Analiz ob'emnykh i kachestvennykh pokazatelei raboty Vostochno-Sibirskogo territorial'nogo Tsentra firmennogo transportnogo obsluzhivaniya s tsel'yu sovershenstvovaniya kachestva predostavleniya uslug klientam zheleznodorozhnogo transporta [Analysis of volume and quality indicators of the East Siberian territorial Center of corporate transport services in order to improve the quality of services provided to railway transport customers]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 54–65. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).54-65.

**Article info**

Received: May 7, 2024; Revised: May 20, 2024; Accepted: May 21, 2024.

**Введение**

Цель научной статьи – провести анализ качества предоставления услуг Восточно-Сибирским территориальным Центром фирменного транспортного обслуживания ОАО «РЖД» (ВС ТЦФТО ОАО «РЖД»), получить количественную оценку показателей удовлетворенности клиентов, пользующихся услугами в сфере грузовых перевозок. В работе проведены исследования клиентоориентированного подхода в новых экономических условиях открытого для конкуренции транспортного рынка приоритетных направлений развития и системы учета доходов от реализации различных видов услуг.

Сегодня на рынке имеется большой выбор поставщиков услуг, особенно в сферах транспортно-логистического бизнеса и складских услуг, а также перевозок грузов разной номенклатуры автомобильным транспортом на расстояния до 1 500 км. В 2023 г. наблюдался

рост и развитие рынка с учетом обновления объектов инфраструктурного комплекса, что свидетельствует об увеличении доли видов услуг «добавленной стоимости», связанных с экспедированием и терминально-складским обслуживанием. В соответствии с этим внедрение системы клиентоориентированного подхода необходимо рассматривать одновременно во всех структурных подразделениях компании ОАО «РЖД» с целью стабилизации спроса, повышения стандартизации и поиска постоянных крупных грузоотправителей и клиентов.

В задачи компании ОАО «РЖД» входит не только эксплуатация железнодорожной инфраструктуры, но и развитие терминально-складских комплексов в городской черте, автоматизация и цифровизация производственных и технологических процессов работы таких комплексов, развитие перевозок сборных грузов в пяти- и десятифутовых контейнерах, внедрение



технологии перегрузки контейнеров по прямому варианту без учета расформирования контейнерных поездов на перегрузочных станциях и т.д. [1, 2].

В настоящее время компания ОАО «РЖД» нацелена на создание дополнительной прибыли за счет удовлетворения требований клиентов в сфере предоставления качественных услуг, их доступности в любое время суток с минимальными сроками и трудозатратами во всех видах деятельности грузовых перевозок, внедрения комплекса услуг, расширения ввода клиентоориентированных цифровых технологий, включая информационное сопровождение на всем пути следования груза (от поставщика до потребителя), обеспечение цифрового контроля за дислокацией и безопасностью груза.

ВС ТЦФТО ОАО «РЖД» предоставляет следующие виды услуг:

- «Организация перевозки грузов в составе грузовых поездов по графику с согласованным временем отправления и прибытия»;
- «Грузовой экспресс» – грузоотправитель бронирует место в отправке сборного грузового экспресса, груз доставляется в пункт назначения в кратчайшие сроки при диспетчерском контроле;
- «От двери до двери» – доставка грузов с применением нескольких видов транспорта с участием дочерних и зависимых обществ;
- «Разработка эскизов, схем, выполнение расчетов грузов, не предусмотренных техническими условиями»;
- «Перевозки с участием паромной переправы» [3, 4].

По итогам работы 2023 г. доходы территориального центра достигли исторического максимума. Общий объем выручки и доходов ОАО «РЖД» показывает рост, что говорит об эффективности политики предприятия [5, 6].

### Основные базовые принципы корпоративной системы организации внутреннего и внешнего клиентоориентирования

В ОАО «РЖД» определена корпоративная система клиентоориентированности, которая заключается в удовлетворении клиента и потребности рынка с минимальными затратами. Компания проводит маркетинговые исследования сегмента рынка, предлагая услуги, соответствующие требованиям конкретного потребителя в данном регионе, информирует клиентов о внедрении новых видов услуг и при получении обратной связи устанавливает долгосрочные взаимоотношения с клиентами, что позволяет эффективно реализовать систему оценки уровня удовлетворенности и лояльности клиентов (рис. 1) [7].

Информацию об услугах, предоставляемых пользователям, можно получать через сайт ОАО «РЖД», колл-центры, расположенные в регионе и из Центра продажи услуг (ЦПУ). Информатизация взаимоотношений с клиентами рассматривается с позиций предоставления им достоверной, полной, ценной, своевременной, понятной, доступной и краткой информации. В ОАО «РЖД» успешно применяется механизм гибкой настройки транспортно-логистических процессов под потребности клиентов с целью эффективной организации всех видов ресурсов и

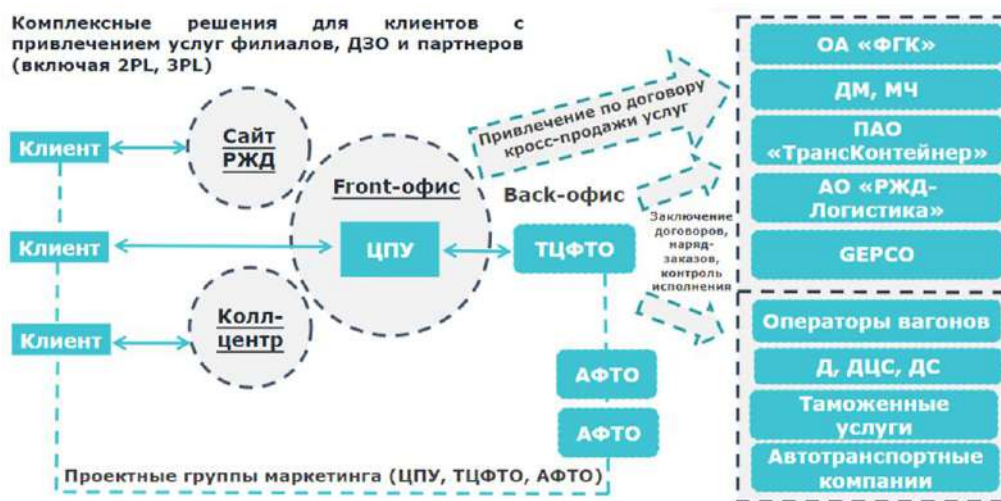


Рис. 1. Комплект услуг для пользователей грузовых перевозок  
Fig. 1. Set of services for freight transport users

снижения непроизводительных потерь. В рамках технологического процесса стороны взаимодействуют в решении вопросов (рис. 2) [8, 9].

### Анализ работы Восточно-Сибирского территориального Центра фирменного транспортного обслуживания. Динамика объемных и качественных показателей обслуживания

Политика в сфере предоставления качественных услуг ВС ТЦФТО ОАО «РЖД» заключается в удовлетворенности потребителей транспортных услуг в грузовых перевозках, повышении эффективности работы за счет сбалансированности коммерческой и клиентоориентированной политики в области грузовых перевозок, роста качества транспортно-экспедиционного обслуживания при повышении безопасности и надежности перевозочного процесса. Политика реализуется по следующим основным направлениям:

- укрепление позиций на рынке транспортно-экспедиционных и логистических услуг за счет повышения качества предоставляемых услуг и целенаправленной работы с клиентами;
- формирование проактивной системы продаж на основе современных форм и методов взаимодействия с клиентами;
- повышение операционной эффективности, оптимизации расходов;
- совершенствование организации производственных процессов;
- внедрение цифровых сервисов в рамках развития проекта «Цифровая трансформация ОАО «РЖД»;

– обеспечение социальной стабильности в трудовых коллективах, проведение единой кадровой, социальной и молодежной политики, развитие эффективной системы информирования и обратной связи;

– развитие корпоративной культуры, соответствующей ценностям и стратегическим задачам холдинга «РЖД», в том числе культуры безопасности движения, включая предотвращение неблагоприятного воздействия на окружающую среду [10, 11].

Результатом деятельности территориального центра являются совершаемые экспедиционные операции, а также предоставление информационных и иных видов услуг в границах Восточно-Сибирской железной дороги. Для повышения эффективности его работы составляется план на рассматриваемый период времени. Для большей наглядности и дифференциации деятельности центра в план работы включаются две группы основных показателей: объемных и финансово-экономических. Основными объемными показателями являются общий объем погрузки по классам грузов. Выполнение объемов технического плана погрузки по классам приведены в табл. 1. Динамика объемных показателей представлена на рис. 3. Все группы груза делятся на классы:

- высокодоходные грузы 3 класса – цветные металлы, бумага, химикаты и сода, лом металлов, метизы, черные металлы, автомобили и др.;
- средне-доходные грузы 2 класса – нефтепродукты, грузы в контейнерах, соль, химические и минеральные удобрения, продо-



Рис. 2. Технологический процесс взаимодействия сторон ОАО «РЖД» с клиентами  
Fig. 2. Technological process of interaction between the JSC «Russian Railways» and clients

вольственные грузы, жмыхи, зерно и др.;

– низкодоходные грузы 1 класса – каменный уголь, лесные грузы, руда железная, строительные материалы, промышленное сырье, цемент, огнеупоры и прочие грузы.

Анализ объемов погрузки показал, что по сравнению с уровнем прошлого года погрузка на железной дороге снизилась на 3 млн 211 тыс. т (5,4 %) (за 2022 г. погружено 59 млн 100 тыс. т). Суммарные объемы погрузки грузов 1 класса являются основной причиной ухудшения показателей. При этом показатели погрузки не имеют данной тенденции относительно технического плана, составленного на 2023 г., за исключением позиций грузов 1 класса – 99,3 % от плана (277,2 тыс. т). Показатели погрузки по 2 классу имеют позитивный характер и превышают запланированный объем в размере 4,0 % (527,2 тыс. т). По 3 классу превышение запланирован-

ного объема составило 5,6 % (194,7 тыс. т). По сравнению с 2022 г. в 2023 г. наблюдался рост погрузки по грузам 2 и 3 классов (5,7 и 5,2 % соответственно). Динамика погрузки грузов 1 класса имеет негативный характер относительно 2022 г. (–9,6 %). Структура погрузки грузов представлена в табл. 2 и на рис. 4, 5 [12, 13].

Поскольку погрузка по классам грузов менялась разными темпами, то изменилась и структура погрузки. Наибольший удельный вес приходится на грузы 1 класса, являющиеся низкодоходными, но при этом их доля упала с 72,0 до 68,8 %. Грузы 2 класса показали прирост с 22,2 до 24,7 %, в то же время грузы 3 класса имеют незначительное повышение – с 5,9 до 6,6 %. В разрезе номенклатуры грузов, перевозимых по Восточно-Сибирской железной дороге, погрузка представлена в табл. 3.

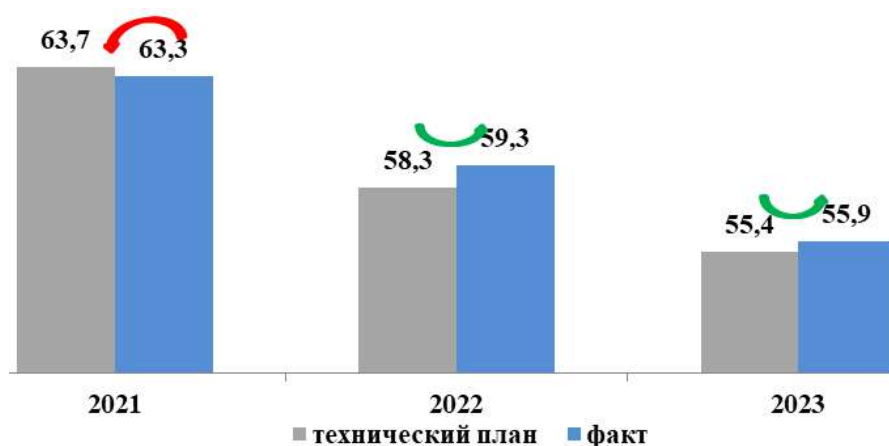


Рис. 3. Динамика факта погрузки к выполнению технического плана в 2021–2023 гг., тыс. т  
Fig. 3. Dynamics of the fact of loading to the fulfillment of the technical plan in 2021–2023, thousands t

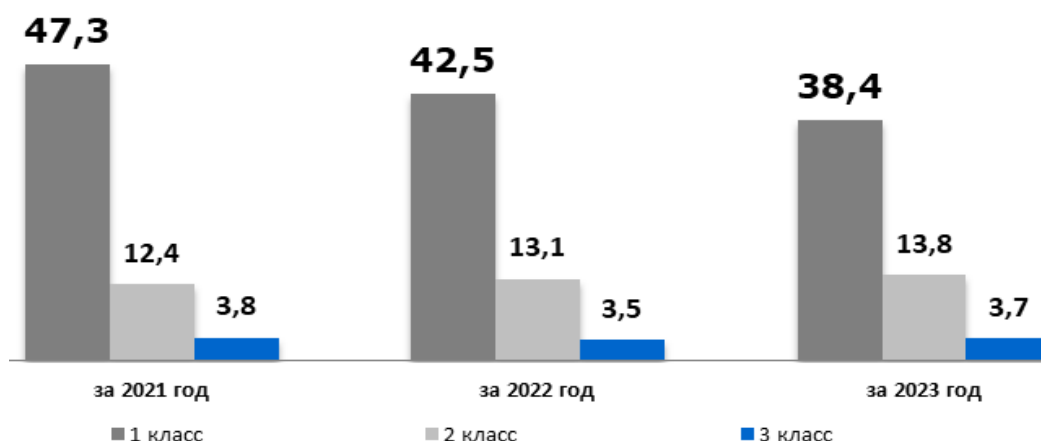


Рис. 4. Динамика погрузки по родам груза в 2021–2023 гг., млн. тонн  
Fig. 4. Dynamics of loading by type of cargo in 2021–2023, million tons

**Таблица 1.** Выполнение технического плана погрузки на Восточно-Сибирской железной дороге за 2023 г.  
**Table 1.** Implementation of the technical loading plan on the East Siberian Railway for 2023

Класс груза Cargo class	2021	2022	2023		
	Факт погрузки, тыс. т The fact of loading, thousand tons	Факт погрузки, тыс. т The fact of loading, thousand tons	Технический план, тыс. т Technical plan, thousand tons	Факт, тыс. т Fact, thousand tons	% выполнения к техническому плану % of completion to the technical plan
3	3 756,7	3 477,7	3 481,9	3 676,7	105,6
2	12 304,7	13 099,4	13 258,1	13 785,3	104,0
1	47 280,2	42 523,3	38 704,8	38 427,6	99,3
<i>Итого:</i> <i>Total</i>	63 341,6	59 100,3	55 444,8	55 889,6	100,8

**Таблица 2.** Структура погрузки грузов по классам в 2022–2023 гг.  
**Table 2.** The structure of cargo loading by class in 2022–2023

Класс груза Cargo class	2021		2022		2023	
	тыс. т thousand tons	%	тыс. т thousand tons	%	тыс. т thousand tons	%
1	47 280,2	74,6	42 523,3	72,0	38 427,6	68,8
2	12 304,7	19,4	13 099,4	22,2	13 785,3	24,7
3	3 756,7	5,9	34 77,6	5,9	3 676,7	6,6
<i>Всего:</i> <i>Total</i>	63 341,6	100	59 100,3	100	55 889,6	100

**Таблица 3.** Объем погрузки по номенклатуре грузов, тыс. т  
**Table 3.** The volume of loading according to the nomenclature of goods, thousand tons

Номенклатура груза Cargo nomenclature	Класс груза Cargo class	2021	2022	2023			
		Факт Fact	Факт Fact	Факт Fact	Изменение к 2019 г., % Change by 2019, %	Изменение к 2020 г., % Change by 2020, %	Удельный вес, % Specific weight, %
Каменный уголь Coal	1	28 843,5	25 865,2	23 362,9	81,0	90,3	41,8
Лесные грузы Timber	1	8 298,7	6 825,2	5 943,2	71,6	87,1	10,6
Руда железная Iron ore	1	5 913,7	5 864,2	4 475,4	75,7	76,3	8,0
Строительные грузы Construction cargo	1	1 823,0	1 795,4	2 088,4	114,6	116,3	3,7
Нефтепродукты Petroleum products	2	8 172,1	8 313,7	8 472,0	103,7	101,9	15,2
Грузы в контейнерах Container cargo	2	3 492,5	4 116,8	4 686,3	134,2	113,8	8,4
Цветные металлы Non-ferrous metals	3	1 095,7	896,6	872,8	79,7	97,3	1,6
Бумага Paper	3	1 251,9	1 273,4	1 306,3	104,3	102,6	2,3
Прочие грузы Other	–	4 450,5	4 149,8	4 682,2	105,2	112,8	8,4
<i>Всего:</i> <i>Total</i>	–	63 341,6	59 100,3	55 889,6	88,2	94,6	100,0



Рис. 5. Структура погрузки по номенклатуре груза в 2023 г., %  
 Fig. 5. Loading structure by cargo type in 2023, %

Одной из основных причин снижения погрузки к уровню прошлого года являются инфраструктурные ограничения в продвижении на Восточный полигон, в том числе на отдельные лимитирующие станции. Снижение погрузки к прошлому году допущено по 15 номенклатурным группам грузов, включая грузы 1 класса 4,096 млн т (9,6 %) за счет угля каменного (2,502 млн т, или 9,7 %), железной руды (1,389 млн т, или 23,7 %), лесных грузов (0,882 млн т, или 12,9 %) [14, 15].

Снижение погрузки обусловлено инфраструктурными и конвенционными ограничениями в восточном направлении; политика, проводимая правительством и министерством лесного комплекса Иркутской области, в соответствии со Стратегией развития лесного комплекса до 2030 г., подразумевает стимулирование внутренней комплексной переработки древесины с вводом новых мощностей с целью повышения эффективности использования лесных ресурсов. Приостановлена производственная деятельность на многих заводах в зонах карантина, снижена деятельность всех видов транспорта, усилена таможенная деятельность на границе.

При этом рост погрузки обеспечен за счет строительных грузов на 0,293 млн т (16,3 %), промышленного сырья на 0,219 млн т (15,1 %), цемента на 0,151 млн т (32,1 %) и других грузов.

Рост погрузки имеется:

– по высокодоходным грузам 3 класса на 0,199 млн т (5,7 %) за счет увеличения погрузки бумаги на 0,033 млн т (2,6 %), лома черных металлов на 0,085 млн т (19,0 %), черных металлов на 0,019 млн т (48,8 %);

– по среднедоходным грузам 2 класса на 0,686 млн т (5,2 %) за счет увеличения погрузки грузов в контейнерах на 0,569 млн т (13,8 %), роста погрузки в связи с переключением погрузки с вагонов на контейнеры, увеличения экспорта бумаги на 362,6 тыс. т и цветных металлов на 192,3 тыс. т, а по внутрироссийскому сообщению – химикатов на 180,1 тыс. т и нефтепродуктов на 0,158 млн т.

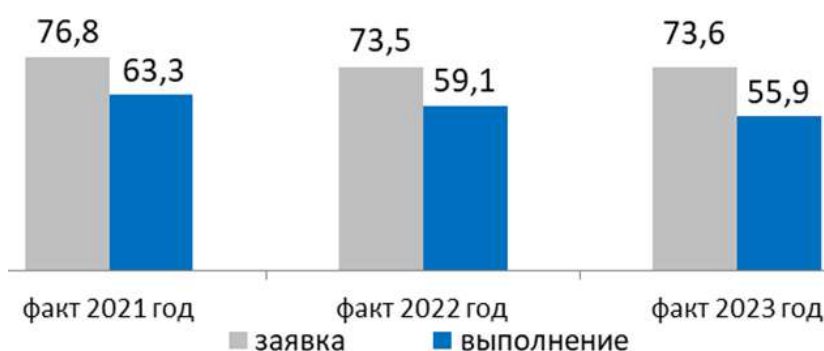
По сравнению с 2022 г. наблюдается рост начислений от выручки в 2023 г. по среднедоходным грузам 2 класса на 4 млрд 978,8 млн р. (20,8 %) и по высокодоходным грузам 3 класса на 2 млрд 195,9 млн р. (30,3 %) [9, 10].

Главной задачей деятельности ВС ТЦФТО является удовлетворение потребностей грузоотправителей в услугах перевозки. Однако сам процесс перевозки не входит в зону ответственности центра и является результатом деятельности других ведомств. Исходя из этого мы не можем дать оценку деятельности территориального центра, основываясь на качественных показателях, учтенных при перевозке (участковая скорость, оборот вагона, грузооборот, среднесуточный пробег и т.д.) [16].

В данном случае критерием эффективности деятельности ВС ТЦФТО может выступать анализ выполнения заявок на перевозку грузов железнодорожным транспортом по форме ГУ-12. Форма заявки на перевозку грузов является единой для всех участников перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Данные по выполнению заявок грузоотправителей представлены в табл. 4 и на рис. 6.

**Таблица 4.** Анализ выполнения заявок грузоотправителей  
**Table 4.** Analysis of fulfillment of shippers' requests

Показатель Indicator	2021	2022	2023		
	Факт, млн т Fact, million tons	Факт, млн т Fact, million tons	Факт, млн т Fact, million tons	Изменение к 2021, % Change by 2021, %	Изменение к 2022, % Change by 2022, %
Заявка Application	76,81	73,53	73,60	95,8	100,1
Выполнение Accomplishment	63,34	59,10	55,89	88,2	94,6
«+ / -» к заявке «+/-» to the application	-13,47	-14,43	-17,71	31,5	22,7
% выполнения % completed	82,5%	80,4%	75,9%	-6,6	-4,5



**Рис. 6.** Динамика выполнения заявки формы ГУ-12 в 2021–2023 гг., млн т  
**Fig. 6.** Dynamics of fulfillment of application form GU-12 in 2021–2023, million tons

**Таблица 5.** Анализ выполнения заявки ГУ-12 по кодам ответственности за 2021–2023 гг. (по данным ГУ-1), тыс. ваг.

**Table 5.** Analysis of the fulfillment of the GU-12 application by responsibility codes for 2021–2023 (according to GU-1 data), thousand wagons

Коды обстоятельств невыполнения заявки и количество незагруженных вагонов, контейнеров Codes of circumstances of non-fulfillment of the application and the number of unloaded wagons, containers					Коды обстоятельств, освобождающих от ответственности перевозчика и грузоотправителя Codes of circumstances exempting the carrier and the shipper from liability					По вине перевозчика Due to the fault of the carrier
Код Code	2021	2022	2023	Изменение 2023 к 2022, % Change 2023 by 2022, %	Код Code	2021	2022	2023	Изменение 2023 к 2022, % Change 2023 by 2022, %	
202	17,4	12,5	18,2	145,5	301	0,4	0,1	–	0,0	Ответственности ОАО «РЖД» нет There is no liability of JSC Russian Railways
404	120,6	87,4	85,4	97,7	302	3,4	18,6	18,4	99,0	
405	7,1	10,4	12,9	124,5	303	20,1	52,1	71,9	138,0	
406	0,8	0,7	2,6	344,9	304	–	–	–	0,0	
407	0,1	0,1	0,1	141,5	307	0,2	0,6	0,2	37,2	
408	1,6	0,9	1,3	147,0	–	–	–	–	–	
Всего Total	147,6	111,9	120,4	107,6	Всего Total	24,1	71,4	90,6	126,9	

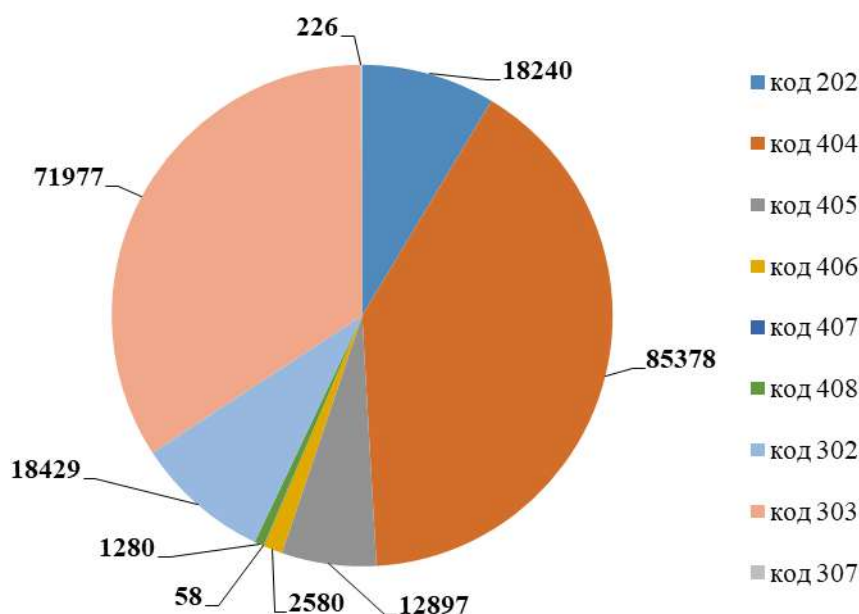


Рис. 7. Структура невыполнения заявки ГУ-12 по кодам за 2023 г., ваг.  
 Fig. 7. Structure of non-fulfillment of the GU-12 application by codes for 2023, wag.

Исходя из анализа выполнения заявок грузоотправителей за последние три года, можно сделать вывод о явно выраженной тенденции снижения спроса на оказание услуги грузоперевозок – уменьшение фактического выполнения заявок в период с 2021 по 2023 г. составило 7,45 млн т. Количество выполненных заявок к общему их числу держится в районе 79,6 %. Невыполнение заявленных объемов зависит как от предприятия, так и от других представителей перевозки. Следовательно, необходимо проанализировать невыполнение заявок по кодам ответственности, для того чтобы увидеть, по чьей вине произошло невыполнение заявленных объемов.

Учет выполнения заявок ГУ-12 ведется в учетных карточках формы ГУ-1 с разложением по кодам ответственности и подписывается с двух сторон – грузоотправителем и перевозчиком. Анализ выполнения заявки ГУ-12 по кодам ответственности представлен в табл. 5. Структура выполнения заявки ГУ-12 показана на рис. 7 [17].

Анализируя структуру выполнения заявок по кодам ответственности, приходим к выводу, что большинство отказов происходят по вине грузоотправителей, а также по причине обстоятельств, освобождающих от ответственности. Исходя из этого можем заявить, что, несмотря на общее падение показателя спроса на

оказание услуг по перевозке грузов, качество их исполнения территориальным центром имеет положительную тенденцию и является устойчиво высоким [18].

### Заключение

После полного изучения производственно-хозяйственной деятельности работы ВС ТЦФТО за период 2021–2023 гг. можем заключить, что несмотря на падение спроса на услуги перевозки железнодорожным транспортом силами ОАО «РЖД», общий объем выручки и доходов растет, что говорит об эффективности политики предприятия.

Тем не менее следует выделить проблему значительного снижения темпов погрузки грузов за указанный период. В первую очередь падение приходится на категорию низкодоходных грузов 1 класса (4 751 тыс. т). Наиболее тревожной же тенденцией снижения имеют грузы 3 класса (279,1 тыс. т), так как они являются высокодоходными и, соответственно, от их реализации будет получена большая прибыль. Только перевозка грузов 2 класса показала рост за рассматриваемый период (794,7 тыс. т).

По итогам проведенного анализа авторами рекомендовано повысить доступность услуг ВС ТЦФТО ОАО «РЖД» для более широкого круга потенциальных клиентов и потребителей. В качестве мероприятий, направленных на ак-

тивизацию в сфере продаж транспортных услуг, следует отметить:

- расширение агентств фирменного обслуживания и центров продаж услуг по сети Иркутского региона и Республики Бурятии;

- беспрепятственный доступ клиентов и потребителей к автоматизированной системе «Этран»;

- информирование участников транспортного рынка о возможностях предоставления услуг ВС ТЦФТО ОАО «РЖД» и как поставщика услуг, и как партнера в транспортном бизнесе;

- комплексное развитие транспортной инфраструктуры и повышение качества работы обслуживающего сервиса, достигаемые за счет внедрения передовых технологий, общей опти-

мизации перевозочного процесса, расширения списка предоставляемых услуг.

Таким образом, для оценки клиентоориентированности транспортной компании может быть использован широкий спектр методов, которые предполагают расчет как количественных, так и качественных показателей, а также позволяют охарактеризовать результативность выстраивания отношений с клиентами с разных сторон.

В заключение хочется отметить, что в целом работу ВС ТЦФТО ОАО «РЖД» можно считать удовлетворительной, однако необходимо обратить внимание на возможности улучшения качества обслуживания клиентов в сфере грузовых перевозок.

### Список литературы

1. Российские железные дороги : сайт / ОАО «РЖД» URL : <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 26.04.2024).
2. Цифровизация // Gudok.ru : сайт. URL : <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1667772&archive=2024.04.25> (Дата обращения 02.05.2024).
3. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Совершенствование процессов транспортно-логистического бизнес-блока по реализации проекта предоставления комплекса услуг // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита, 2022. Т. 1. С. 262–270.
4. Остро стоит вопрос равновесия между желанием одних заработать и стратегической задачей сохранения на плаву предприятий // Gudok.ru : сайт. URL : <https://www.gudok.com/eksperty/aleksey-shilo-ostro-stoit-vopros-ravnesiya-mezhdu-zhelaniem-odnih-zarabotat-i/> (Дата обращения 30.04.2024).
5. 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. 20.02.2024). Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
6. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
7. Центр фирменного транспортного обслуживания – филиал ОАО «РЖД» (ЦФТО) // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=61#enttab-main> (Дата обращения 29.04.2024).
8. Динец Д.А., Коногопов М.В. Международные транспортные коридоры для России // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т. 2. С. 48–53.
9. Восточно-Сибирский территориальный центр фирменного транспортного обслуживания / ОАО «РЖД» : сайт. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=1742> (Дата обращения 29.04.2024).
10. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Декомпозиция основных бизнес-процессов и зоны формирования рисков железнодорожной транспортной системы в сфере грузовых перевозок // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 4 (63). С. 44–52.
11. Автомонова К.Ю. Анализ транспортно-логистического сервиса филиала ОАО «РЖД» центра фирменного транспортного обслуживания // Молодой исследователь : вызовы и перспективы : сб. ст. по материалам СХСХVI Междунар. науч.-практ. конф. М., 2021. Т. 1 (196). С. 585–588.
12. Варламова Н.Х., Мазько Н.Н., Варламов А.В. Повышение эффективности управления и реализация клиентоориентированного подхода за счет совершенствования порядка сопровождения клиентов в центрах фирменного транспортного обслуживания // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 4 (100). С. 61–66.
13. Костыльков М.Н. Развитие российского рынка легковых автомобилей : автореф. дис. ... канд. экон. наук. М., 2002. 23 с.
14. Позднякова М.В. Система фирменного транспортного обслуживания как составляющая коммерческой деятельности на железнодорожном транспорте // Корпоративное управление экономической и финансовой деятельностью на железнодорожном транспорте : сб. тр. по результатам V Междунар. науч.-практ. конф. М., 2020. Т. 19. С. 261–267.
15. Быкадоров С.А., Пятаев М.В. Совершенствование ключевых показателей удовлетворенности клиентов железнодорожного транспорта // Логистика – евразийский мост : материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск ; Енисейск, 2020. С. 17–20.
16. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Инновационные подходы к оценке погрузочно-разгрузочных операций на местах общего пользования (на примере Восточного полигона железных дорог) // Постсоветский материк. 2022. № 3 (35). С. 65–75.



17. Поспелова П.В., Файзрахманова Е.В. Развитие и совершенствование мультимодальных грузовых перевозок транспортной компании на примере ООО «Деловые линии» // *Инновационная экономика : перспективы развития и совершенствования*. 2023. № 4 (70). С. 97–103.
18. Шило А.Н. Реализуя принципы клиентоориентированности // *Железнодорожный транспорт*. 2019. № 2. С. 11–14.

### References

- Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed April 26, 2024).
- Tsifrovizatsiya (Elektronnyi resurs) [Digitalization (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1667772&archive=2024.04.25> (Accessed May 2, 2024).
- Vlasova N.V., Olentsevich V.A. [Improving the processes of the transport and logistics business block for the implementation of a project to provide a range of services]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym ucha-stiem) «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the VI All-Russian scientific and practical conference (with international participation) «Education – Science – Production»]. Chita, 2022, vol. 1, pp. 262–270.
- Ostro stoit vopros ravnovesiya mezhdru zhelaniem odnih zarabotat' i strategicheskoi zadachei sokhraneniya na plavu predpriyatii (Elektronnyi resurs) [There is an acute question of balance between the desire of some to make money and the strategic task of keeping enterprises afloat (Electronic resource)]. Available at: <https://www.gudok.com/eksperty/aleksey-shilo-ostro-stoit-vopros-ravnovesiya-mezhdru-zhelaniem-odnih-zarabotat-i/> (Accessed April 30, 2024).
- 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. 20.02.2024) [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. February 20, 2024)].
- 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 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].
- Tsentr firmennogo transportnogo obsluzhivaniya – filial OAO «RZhD» (TsFTO) (Elektronnyi resurs) [Center for branded transport services – a branch of JSC «Russian Railways»] (CBTS) (Electronic resource). Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=61#enttab-main> (Accessed April 29, 2024).
- Dinets D.A., Konotopov M.V. Mezhdunarodnye transportnye koridory: perspektivy dlya Rossii [International transport corridors: prospects for Russia]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 2, pp. 48–53.
- Vostochno-Sibirskii territorial'nyi tsentr firmennogo transportnogo obsluzhivaniya [East Siberian territorial center of corporate transport services (Electronic resource)]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=1742> (Accessed April 29, 2024).
- Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Dekompozitsiya osnovnykh biznes-protsessov i zony formirovaniya riskov zheleznodorozhnoi transportnoi sistemy v sfere gruzovykh perevozk [Decomposition of the main business processes and the risk formation zone 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.
- Avtomonova K.Yu. Analiz transportno-logisticheskogo servisa filiala OAO «RZhD» tsentra firmennogo transportnogo obsluzhivaniya [Analysis of the transport and logistics service of the branch of JSC Russian Railways, the center of corporate transport services]. *Sbornik statei po materialam CXCVI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Molodoi issledovatel': vyzovy i perspektivy»* [Proceedings of the CXCVI International Scientific and Practical Conference «Young researcher: challenges and prospects»]. Moscow, 2021, vol. 1 (196), pp. 585–588.
- Varlamova N.Kh., Maz'ko N.N., Varlamov A.V. Povyshenie effektivnosti upravleniya i realizatsiya klientoorientirovannogo podkhoda za schet sovershenstvovaniya poryadka soprovozhdeniya klientov v tsentrakh firmennogo transportnogo obsluzhivaniya [Increasing management efficiency and implementing a client-oriented approach by improving the procedure for supporting clients in corporate transport service centers]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region], 2023, no. 4 (100), pp. 61–66.
- Kostyl'kov M.N. Razvitie rossiiskogo rynka legkovykh avtomobilei [Development of the Russian passenger car market]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2002. 23 p.
- Pozdnyakova M.V. Sistema firmennogo transportnogo obsluzhivaniya kak sostavlyayushchaya kommercheskoi deyatel'nosti na zheleznodorozhnom transporte [The system of corporate transport services as a component of commercial activities in railway transport]. *Sbornik trudov po rezul'tatam V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Korporativnoe upravlenie ekonomicheskoi i finansovoi deyatel'nosti yu na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings V International Scientific and Practical Conference «Corporate management of economic and financial activities in railway transport»]. Moscow, 2020, vol. 19, pp. 261–267.
- Bykadorov S.A., Pyataev M.V. Sovershenstvovanie klyuchevykh pokazatelei udovletvorennosti klientov zheleznodorozhnogo transporta [Improving key indicators of customer satisfaction in railway transport]. *Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Logistika – evraziiskii most»* [Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «Logistics – Eurasian Bridge»]. Krasnoyarsk – Eniseisk, 2020, pp. 17–20.

16. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Innovatsionnye podkhody k otsenke pogruzochno-razgruzochnykh operatsii na mestakh obshchego pol'zovaniya (na primere Vostochnogo poligona zheleznykh dorog) [Innovative approaches to assessing loading and unloading operations in public areas (using the example of the Eastern railway range)]. *Postsovetskii materik* [Post-Soviet continent], 2022, no. 3 (35), pp. 65–75.

17. Pospelova P.V., Faizrakhmanova E.V. Razvitie i sovershenstvovanie mul'timodal'nykh gruzovykh perevozok transportnoi kompanii na primere OOO «Delovye linii» [Development and improvement of multimodal freight transportation of a transport company using the example of Business Lines LLC]. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya* [Innovative economics: prospects for development and improvement], 2023, no. 4 (70), pp. 97–103.

18. Shilo A.N. Realizuya printsipy klientoorientirovannosti [Implementing the principles of customer focus]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2019, no. 2, pp. 11–14.

#### 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.

**Брытков Владимир Сергеевич**, аспирант кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vladimirbrytkov99@yandex.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.

**Vladimir S. Brytkov**, Ph.D. Student of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vladimirbrytkov99@yandex.ru.

## Повышение надежности работы устройств дистанционного управления и мачтовых разъединителей

Е.Ю. Пузина✉, М.И. Крапивин, А.П. Куцкий

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

✉lena-rus05@mail.ru

### Резюме

В процессе эксплуатации устройств управления объектами систем тягового электроснабжения приходится сталкиваться с их отказами вследствие возникновения аварийных режимов в виде короткого замыкания в контактной сети и удара молнии в оборудование, близко расположенное к устройствам управления. Как следствие, происходят повреждения устройств теле-дистанционного управления и «самоходы» мачтовых разъединителей контактной сети и воздушных линий. Анализ статистики отказов названных устройств, выполненный для одной из дирекций «Трансэнерго», показал, что две трети приводов мачтовых разъединителей имеют риск повреждения цепей их дистанционного управления, поэтому данная проблема является актуальной как для обследуемой дирекции отдельной железной дороги, так и для всей сети ОАО «Российские железные дороги». С целью уточнения величины напряжения, под действием которого повреждается изоляция цепей вторичной коммутации приводов, разработана модель короткого замыкания в контактной сети в программном комплексе Fazonord. Результаты моделирования подтвердили высокую опасность возникающих при этом напряжений в рельсовых цепях. В связи с этим разработаны меры по защите устройств теледистанционного управления и мачтовых разъединителей от «самохода». К таковым относятся: усиление цепей вторичной изоляцией; изоляция конструкций разъединителей и приводов от низкоомных опор; применение защиты от перенапряжений в цепях дистанционного управления; перенос стоек теледистанционного управления и пультов дистанционного управления на минимальное безопасное расстояние к приводам и использование схемных решений по заземлению приводов на рельсовые цепи. При исследовании задействовались следующие методы: статистический анализ информации о состоянии цепей теледистанционного управления и мачтовых разъединителей; имитационное моделирование в программном вычислительном комплексе «Кортэс» режима короткого замыкания в контактной сети; компьютерное моделирование в программном вычислительном комплексе Fazonord с целью расчета напряжения в рельсовой цепи при коротком замыкании в контактной сети.

### Ключевые слова

мачтовые разъединители, устройства теледистанционного управления, аварийные режимы, защитные мероприятия, программный вычислительный комплекс

### Для цитирования

Пузина Е.Ю. Повышение надежности работы устройств дистанционного управления и мачтовых разъединителей / Е.Ю. Пузина, М.И. Крапивин, А.П. Куцкий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 66–78. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).66-78.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 05.06.2024 г.; поступила после рецензирования: 10.06.2024 г.; принята к публикации: 13.06.2024 г.

## Improving the reliability of remote control devices and mast disconnectors

E.Yu. Puzina✉, M.I. Krapivin, A.P. Kutsyi

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

### Abstract

During the operation of control devices for traction power supply systems, it is necessary to deal with their failures due to the occurrence of such emergency modes as a short circuit in the contact network and lightning strikes in equipment close to the control devices. As a result, damage to tele-remote control devices and self-propelled mast disconnectors of the contact network and overhead lines occur. An analysis of the failure statistics of these devices, performed for one of the Transenergo directorates, showed that two thirds of the drives of mast disconnectors have a risk of damage to their remote control circuits. Therefore, this problem is relevant both for the surveyed directorate of a separate railway and for the entire network of Russian railways. In order to clarify the magnitude of the voltage under which the insulation of the secondary switching circuits of the drives is damaged, a short circuit model in the contact network in the Fazonord software package has been developed. The simulation results confirmed the high risk of stresses in rail circuits arising in this case. In this regard, measures have been developed to protect remote control devices and mast disconnectors from self-propelled guns. These include: strengthening the insulation of secondary circuits; isolation of disconnector and

drive structures from low-resistance supports; application of surge protection in remote control circuits; transfer of control racks and remote controls to the minimum safe distance to the drives and circuit solutions for grounding drives on rail circuits. In the course of the work, the following research methods were used: statistical analysis of information on the state of the tele-remote control and mast disconnector circuits; the method of simulation modeling in software computing complex «Cortes» of the short-circuit mode in contact network; the method of computer modeling in software computing complex «Fazonord» in order to calculate the voltage in the rail circuit during a short circuit in the contact network.

### Keywords

mast disconnectors, remote control devices, emergency modes, protective measures, software computing complex

### For citation

Puzina E.Yu., Krapivin M.I., Kutsyi A.P. Povyshenie nadezhnosti raboty ustroystv distantsionnogo upravleniya i machtovykh raz'edinitelei [Improving the reliability of remote control devices and mast disconnectors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 66–78. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).66-78.

### Article Info

Received: June 5, 2024; Revised: June 10, 2024; Accepted: June 13, 2024.

### Введение

Современные технологии в области электроэнергетики позволяют осуществлять удаленное управление объектами систем электроснабжения. Однако при использовании теледистанционного управления (ТУ-ДУ) в системах тягового электроснабжения возникает ряд проблем:

- необходимость защиты данных устройств от аварийных режимов;
- разработка и применение защитных мер для мачтовых разъединителей контактной сети (КС) и воздушных линий (ВЛ) от «самохода».

При «самоходе» провода линий электропередачи могут замыкаться между собой или на землю, что может привести к аварийным ситуациям и повреждению оборудования.

Решение перечисленных проблем является актуальной задачей, поскольку приведет к снижению количества повреждений исследуемых устройств и, тем самым, повысит надежность работы систем тягового электроснабжения [1–5].

### Постановка задачи исследования

Целью данной работы является разработка конкретных мер по защите устройств ТУ-ДУ в аварийных режимах и защите мачтовых разъединителей от «самохода» [6, 7]. Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

- анализ причин повреждений устройств ТУ-ДУ и причин «самохода» разъединителей при повреждении изоляции цепей дистанционного управления (ДУ);
- разработка модели замыкания КС на рельсовой цепи (РЦ) в программном вычисли-

тельном комплексе (ПВК) Fazonord;

- моделирование режима короткого замыкания в КС для определения напряжения в РЦ в этом режиме;
- разработка мер по защите исследуемых устройств.

Реализация указанной цели должна привести к снижению повреждений устройств ТУ-ДУ и мачтовых разъединителей КС и ВЛ в аварийных режимах, а также обеспечить их защиту от возможного «самохода».

### Анализ состояния и причин повреждений устройств теледистанционного управления и мачтовых разъединителей

Выполним анализ состояния и причин повреждений устройств ТУ-ДУ и мачтовых разъединителей по нескольким направлениям.

*Анализ состояния цепей дистанционного управления по данным дистанций электроснабжения*

Проведен анализ состояния цепей ДУ приводами разъединителей КС и ВЛ, имеющих в хозяйстве одной из дирекций по энергообеспечению АО «Трансэнерго».

По результатам анализа (табл. 1) выявлено, что по хозяйству электроснабжения обследуемой дирекции при существующих условиях эксплуатации из 1 965 приводов разъединителей КС и ВЛ:

- 1 351 привод с риском повреждения цепей ДУ;
- 376 приводов требуют изоляции конструкций от тела опоры в целях электробезопасности и сохранности цепей ДУ;

– 264 привода нарушают требования содержания устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), так как заземлены наглухо на РЦ с сопротивлением менее 100 Ом.

Стоит отметить, что при наличии близко расположенных дроссель-трансформаторов (ДТ) 607 разъединителей заземлены на рельс, что увеличивает риск их повреждения практически в 2 раза.

Для определения актуальности проблемы повреждения устройств ТУ-ДУ на железной

дороге, хозяйство электроснабжения которой обслуживается работниками данной дирекции, собрана информация о количестве поврежденных устройств за 2023 г. (табл. 2).

В соответствии с представленными данными за 2023 г в ЭЧ-5 выявлено 75 случаев повреждения устройств ТУ-ДУ, что оказывает крайне негативное влияние на пропуск поездов и расход материальных ресурсов в обследуемой дирекции.

**Таблица 1.** Оценка состояния цепей дистанционного управления приводами разъединителей контактной сети и высоковольтных линий

**Table 1.** Assessment of the condition of remote control drive circuits of contact network disconnectors and high-voltage lines

Показатель Indicator	ЭЧ-										Итого Total
	1	2	5	6	7	8	9	10	11		
Общее количество опор с разъединителями дистанционного управления Total number of supports with remote control disconnectors	261	235	494	226	138	189	115	250	57	1 965	
Количество разъединителей с превышением допустимого напряжения в аварийном режиме Number of disconnectors with excess voltage in emergency mode	203	194	336	117	98	115	89	157	42	1 351	
Количество приводов, требующих изоляции привода от тела опоры и заземление приводов отдельным спуском, либо на дроссель-трансформатор Number of drives requiring insulation of the drive from the support body and grounding of the drives with a separate descent, or to a choke-transformer	112	100	48	80	–	36	–	–	–	376	
Количество приводов и опор, требующих перемонтажа заземления опоры с разъединителями, заземленных на релейную цепь с нарушением требований по сигнализации, централизации и блокировке Number of drives and supports requiring re-installation of support grounding with disconnectors, grounded to the relay circuit in violation of requirements for signaling, centralization and blocking	57	5	33	9	35	2	5	118	–	264	
Наличие близко расположенных дроссель-трансформаторов для заземления либо возможность их дополнительной установки The presence of closely located choke transformers for grounding or the possibility of their additional installation	92	146	98	–	57	–	10	197	7	607	

**Таблица 2.** Результаты повреждений устройств теледистанционного управления за 2023 г.  
**Table 2.** Results on damage to remote control devices for 2023

Квартал Quarter	ЭЧ-1	ЭЧ-2	ЭЧ-5	ЭЧ-6	ЭЧ-7	ЭЧ-8	ЭЧ-9	ЭЧ-10	ЭЧ-11	Итого Total
1	4	4	23	8	4	4	1	51	4	103
2	4	1	16	6	3	16	14	30	4	94
3	7	4	11	9	5	13	22	42	3	116
4	4	2	25	10	4	12	14	53	2	126
Итого Total	19	11	75	33	16	45	51	176	13	439

В соответствии с анализом повреждений можно выделить случаи, при которых происходит электрическое повреждение изоляции одного элемента (обычно привода разъединителя), нескольких элементов (двух и более приводов, пульта аппаратуры управления приводами (АУП) [8], стойки телеуправления, кабелей вторичной коммутации).

В некоторых случаях создаются условия для «самохода» разъединителей, что угрожает повреждением главных контактов силовой цепи разъединителей и несанкционированным снятием напряжения с КС участков питания, что приведет к развитию повреждений и остановке поездов.

#### Причины повреждений устройств теледистанционного управления

Отказы устройств ТУ-ДУ чаще всего происходят при воздействии следующих явлений:

– короткое замыкание на электровозах или в КС (рис. 1);

– удары молнии в оборудование, находящееся на относительно малом расстоянии от приводов разъединителей [1].

Стоит отметить, что вследствие удара молнии может произойти короткое замыкание в КС из-за срабатывания устройств защиты от перенапряжений или перекрытия изоляции под воздействием дуговых молниевых разрядов.

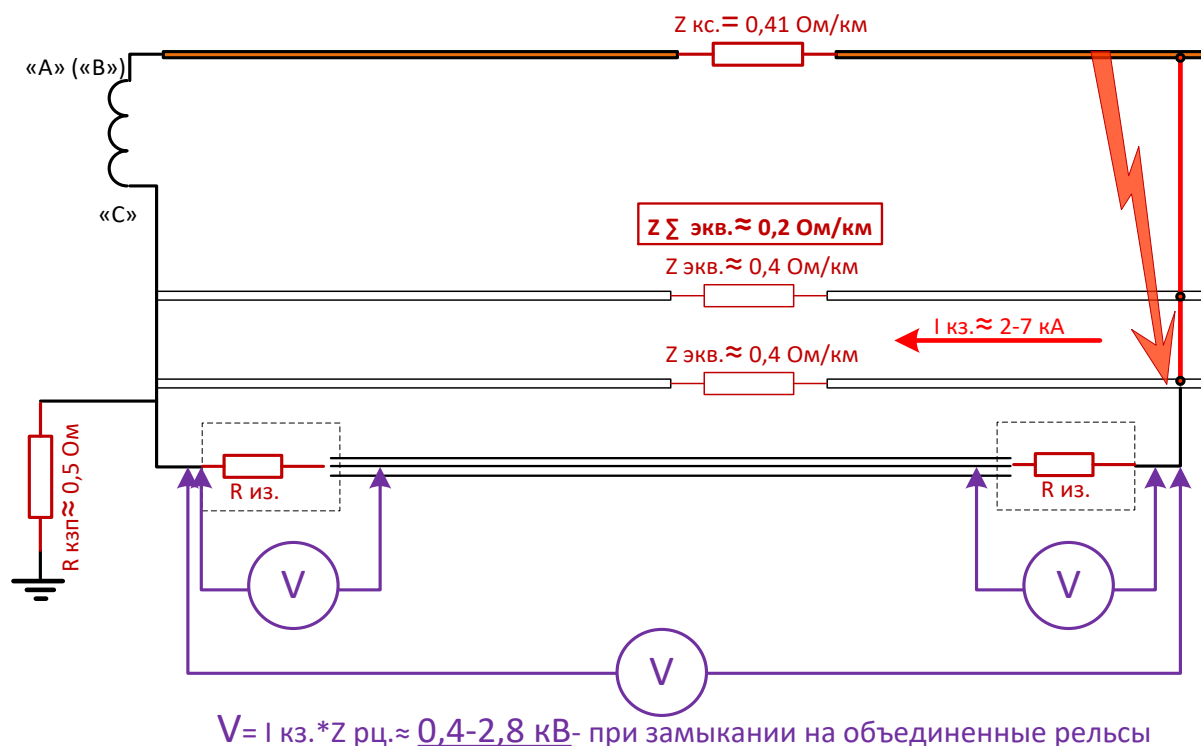
Указанные явления вызывают возникновение напряжения в РЦ, в результате появляется напряжение между корпусом привода и кабелями вторичной коммутации и далее контуром заземления тяговой подстанции или поста электрической централизации (ЭЦ) значение которого достигает 500–5 000 В и более в течение 0,1–0,5 с., что соответствует времени срабатывания устройств релейной защиты и автоматики. Таким образом, под воздействием этого высокого уровня напряжения и развивается процесс повреждения устройств ТУ-ДУ.

Принцип возникновения напряжения на РЦ в точке заземления привода представлен на рис. 2.



**Рис. 1.** Электрические параметры, сопровождающие повреждения устройств теледистанционного управления

**Fig. 1.** Electrical parameters accompanying damage to remote control devices



**Рис. 2.** Возникновение напряжения на релейной цепи в точке заземления привода

**Fig. 2.** The occurrence of voltage on the relay circuit at the drive grounding point

Как видим, причиной этого является процесс протекания тока короткого замыкания по РЦ в направлении к тяговому трансформатору [9]. Поскольку в момент короткого замыкания благодаря нелинейным свойствам стали активное сопротивление рельсов значительно возрастает, то это приводит к существенному увеличению уровня напряжения, воздействующего на изоляцию кабелей вторичной коммутации, которое фактически равно падению напряжения на РЦ.

В случае возникновения удара молнии из-за значительного тока величина возникающего напряжения обычно лежит в пределах 10–20 кВ, в редких случаях достигая 70 кВ. Естественно, эти значения более чем опасны для изоляции кабелей вторичной коммутации устройств ТУ-ДУ. Однако следует учитывать, что молниевые разряды, имея высокую частотную характеристику, не распространяются по протяженным металлическим проводникам (в среднем до 300 м).

В целях предотвращения отказов устройств ТУ-ДУ необходимо применять защитные меры от перечисленных явлений.

*Причины самохода разъединителей при повреждении изоляции дистанционного управления*

1. При пробое изоляции на одном из приводов, как правило, происходит замыкание на землю и между собой всех трех схемных проводов, как в приводе, так и в АУП привода. Данное замыкание приводит к отключению питания АУП штатной токовой защитой и/или перегоранием штатных предохранителей питания. С учетом подключения цепей сигнализации к управляющим проводам и объединения их через контакты реле ТУ-ДУ на общую точку, происходит объединение всех управляющих проводов всеми приводами через цепи сигнализации с замыканием на контур тяговой подстанции. Таким образом, в момент короткого замыкания создается цепь протекания части тока короткого замыкания через кабель вторичной коммутации по пути: «КС – место повреждения – РЦ – заземление привода – поврежденная изоляция вторичной коммутации привода – жилы кабеля 1, 2, 3 привода с поврежденной изоляцией – поврежденные цепи сигнализации (либо другая поврежденная аппаратура) в АУП – контур заземления подстанции и фаза «С» тягового трансформатора».

2. Режим воздействия тока короткого замыкания кратковременный – 0,1 с при замыкании вблизи тяговых подстанций, либо 0,5 с. – при удаленных замыканиях.

3. Протекание тока короткого замыкания вызывает кратковременную разность потенциалов между жилами «2» и «3» («1») неповрежденных приводов величиной до 2,4 кВ. Данная величина не способна осуществить полноценное переключение, однако может привести к сдергиванию привода либо повреждению его изоляции.

4. При отсутствии повреждения изоляции смежных приводов после отключения тока короткого замыкания система переходит в режим транзита через кабель вторичной коммутации по пути: «КС – место повреждения – РЦ – заземление привода – поврежденная изоляция вторичной коммутации привода – жилы кабеля 1, 2, 3 привода с поврежденной изоляцией – поврежденные цепи сигнализации (либо другая поврежденная аппаратура) в АУП – контур заземления подстанции и фаза «С» тягового трансформатора».

5. Протекание тягового тока вызывает длительную разность потенциалов между жилами «2» и «3» («1») неповрежденных приводов величиной от 140 до 250 В. Данная величина способна осуществить полноценное переключение и не повреждает изоляцию смежного привода.

6. Молниевые разряды, имея высокую частотную характеристику, не распространяются по протяженным металлическим проводникам (в среднем до 300 м). Таким образом, для снижения вероятности влияния молниевых разрядов на низковольтные цепи, рекомендуется располагать приводы и разъединители с ДУ, максимально далеко от устройств грозозащиты (разрядников, ограничители перенапряжения нелинейные) – не ближе 300 м.

В результате анализа выявлены электрические параметры, от которых необходимо защищаться для уменьшения вероятности повреждения вторичной коммутации цепей ТУ-ДУ:

- напряжение в РЦ величиной свыше допустимого для низковольтной коммутации;
- токи в кабелях ДУ, превышающие допустимые токи жил кабелей ДУ;
- время воздействия аварийных режимов.

Основным «спусковым крючком» аварийного режима, приводящим в действие про-

цесс повреждения, является высокий уровень напряжения РЦ относительно цепей вторичной коммутации и далее контура подстанции или поста ЭЦ.

### **Расчет напряжения в рельсовой цепи при коротком замыкании в контактной сети**

#### *Моделирование короткого замыкания в контактной сети*

Для моделирования режима короткого замыкания в КС [10–15] с целью определения величины тока использован программный комплекс «Кортэс». В качестве примера рассмотрен участок ДЛ – АН Восточного полигона.

Имитационная модель для режима короткого замыкания в левом и правом плечах КС, питающихся от подстанции ДЛ, в качестве примера представлена на рис. 3.

Результаты моделирования по всем подстанциям, постам секционирования (ПС), пунктам параллельного соединения (ППС) исследуемого участка приведены в табл. 3.

#### *Разработка модели замыкания контактной сети на релейную цепь в программно-вычислительном комплексе Fazonord*

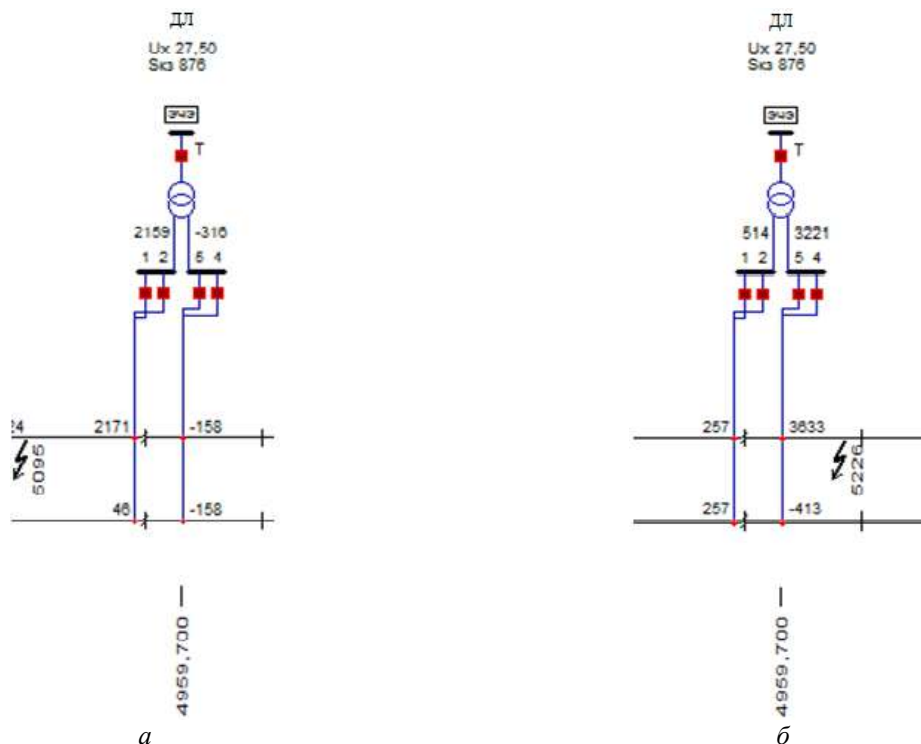
Для решения задачи определения величины напряжения в точке короткого замыкания в КС и относительно «удаленной земли» разработана модель замыкания КС на рельс в ПВК Fazonord (рис. 4) [11]. На рисунке использованы следующие обозначения:  $J$  – источник тока, с помощью которого моделируется ток короткого замыкания на рельс;  $R1-RL(C)$  – элемент, с помощью которого оценивается уровень напряжения в РЦ в точке короткого замыкания и в точке относительно «удаленной земли» (сопротивление данного элемента принимается 1 000 Ом из условия ограничения по напряжению 1 000 В);  $R2-RL(C)$  – элемент, с помощью которого моделируется замыкание на два рельса (сопротивление данного элемента, равное ранее рассчитанным значениям тока короткого замыкания, подставляем в источник тока и далее с помощью элемента  $R1$  оцениваем уровень напряжения в РЦ в точке замыкания и в точке относительно «удаленной земли»). Полученные значения сведены в табл. 4.

Анализ значений напряжения в точке короткого замыкания и относительно «удаленной земли» на участке ДЛ – АН позволяет сделать вывод, что оборудование ТУ-ДУ не выдержива-



ет данные напряжения, так как предельно допустимое напряжение в точке относительно «удаленной земли» составляет 1 000 В, а при возникновении короткого замыкания на одиночный рельс – до 2 000 В, что является критичным для

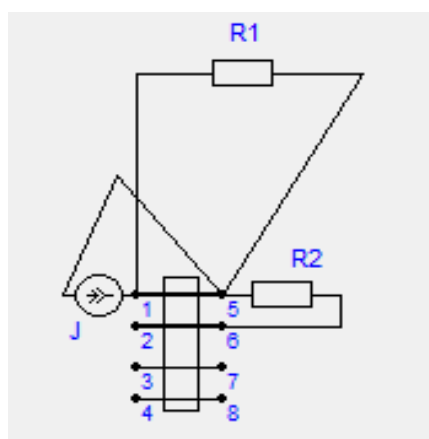
изоляции низковольтных цепей ТУ-ДУ. Следовательно, происходит разрушение данного оборудования, что приводит к «самоходу» разъединителей (0,01 Ом).



**Рис. 3.** Имитационная модель короткого замыкания в контактной сети в левом (а) и правом (б) плече  
**Fig. 3.** Simulation model of a short circuit in the contact network in the left (a) and right (b) shoulder

**Таблица 3.** Значения тока короткого замыкания на релейной цепи  
**Table 3.** Short-circuit current values in a relay circuit

Подстанция, пост секционирования, пункт параллельного соединения Substation, sectioning post, parallel connection point	Максимальный ток короткого замыкания, А Maximum short-circuit current, A	Ток релейной цепи на «запад», А Relay circuit current to the «west», A	Ток релейной цепи на «восток», А Relay circuit current to the «east», A	Максимальное безопасное расстояние от пульта дистанционного управления до привода разъединителя, м Maximum safe distance from the remote control to the disconnector drive, m
ДЛ	5 804	2 171	3 633	475
ЗЛ	6 790	4 448	2 342	381
ГЛ	7 400	2 356	5 044	344
ПЛ	7 645	5 271	2 374	330
УС	7 646	5 421	2 225	321
СХ	7 587	5 039	2 548	344
ИС	6 797	4 229	2 568	374
ГН	8 553	2 617	5 936	292
РС	8 209	5 272	2 937	293
ППС ОГ	7 825	3 740	4 085	423
ПД	7 831	2 783	5 048	345
ПС ГЛ	8 969	5 045	3 924	324
АН	9 244	5 297	3 947	324



**Рис. 4.** Модель замыкания контактной сети на рельс в программном вычислительном комплексе Fazonord  
**Fig. 4.** Model of contact network closure on rail in the Fazonord software computing complex

**Таблица 4.** Расчетные значения напряжения в точке короткого замыкания и относительно «удаленной земли»

**Table 4.** Calculated values of voltage at the short circuit point and relative to the «remote ground»

Подстанция, пост секционирования, пункт параллельного соединения Substation, sectioning post, parallel connection point	Расчитанное значение напряжения, кВ Calculated voltage value, kV	
	В точке короткого замыкания At the point of short circuit	Относительно «удаленной земли» Relative to «remote ground»
ДЛ	3,00	1,50
ЗЛ	3,34	1,67
ГЛ	3,46	1,73
ПЛ	3,54	1,77
УС	3,40	1,70
СХ	3,50	1,75
ИС	3,42	1,71
ГН	3,70	1,85
РС	3,76	1,88
ППС ОГ	3,56	1,78
ПД	3,58	1,79
ПС ГЛ	3,36	1,68
АН	3,84	1,92

#### **Разработка мер по защите устройств теледистанционного управления в аварийных режимах и защита мачтовых разъединителей контактной сети и высоковольтных линий от самохода**

Существует ряд разработок в области повышения надежности работы двигательных приводов [16–22]. В настоящей работе предлагаются, исходя из результатов анализа статистики повреждений приводов мачтовых разъединителей и устройств ТУ-ДУ, следующие меры их защиты.

1. Усиление изоляции цепей вторичной коммутации.

В качестве предупредительных мер по

усилению изоляции устройств предлагается:

- замена тумблеров с металлическим корпусом на полимерные;
- замена винтов колодок подключения на короткие винты;
- замена кнопок блокировки с металлическим корпусом на полимерные;
- дополнительная изоляция кожуха двигателя относительно корпуса листовым полимерным материалом.

2. Изоляция конструкций разъединителей и приводов от низкоомных опор.

Ручное переключение привода, заземленного через искровой промежуток, является крайне опасным действием, так как при повре-

ждении изоляции (например, в результате излома колонки) на конструкцию подается рабочее напряжение величиной 27,5 кВ. При дистанционном переключении данное напряжение, безусловно, приведет к развитию аварии в цепях ДУ. Защититься от воздействия 27,5 кВ не представляется возможным.

С другой стороны, при глухом заземлении низкоомных опор с приводами возникает асимметрия тяговых токов, что может привести к неисправностям в цепях автоблокировки и ложным показаниям напольной и локомотивной сигнализации.

Кардинальное решение – это установка дополнительной высокоомной опоры с переносом привода, что требует больших материальных и физических затрат.

В качестве меры изоляции приводов от тела опоры предлагается вместо всех металли-

ческих болтовых соединений внедрить полиамидные болты, гайки, шайбы и фланцевые прокладки (рис. 5).

3. Применение защиты от перенапряжений в цепях дистанционного управления.

Штатная защита на базе искровых промежутков (варисторов), установленная в пультах ДУ, не обеспечивает защиту цепей ТУ по причине завышенного предела срабатывания (600–1 200 В) и защиту от «самохода», так как при срабатывании не исключает связь внешних цепей и контура заземления пульта ДУ.

В настоящее время защита цепей от перенапряжений, исключающая повреждение оборудования ДУ, не разработана. Предлагается в качестве защиты от перенапряжений использовать заводские реле типа РН-111 с установкой в питающие и управляющие провода каждого привода (рис. 6).

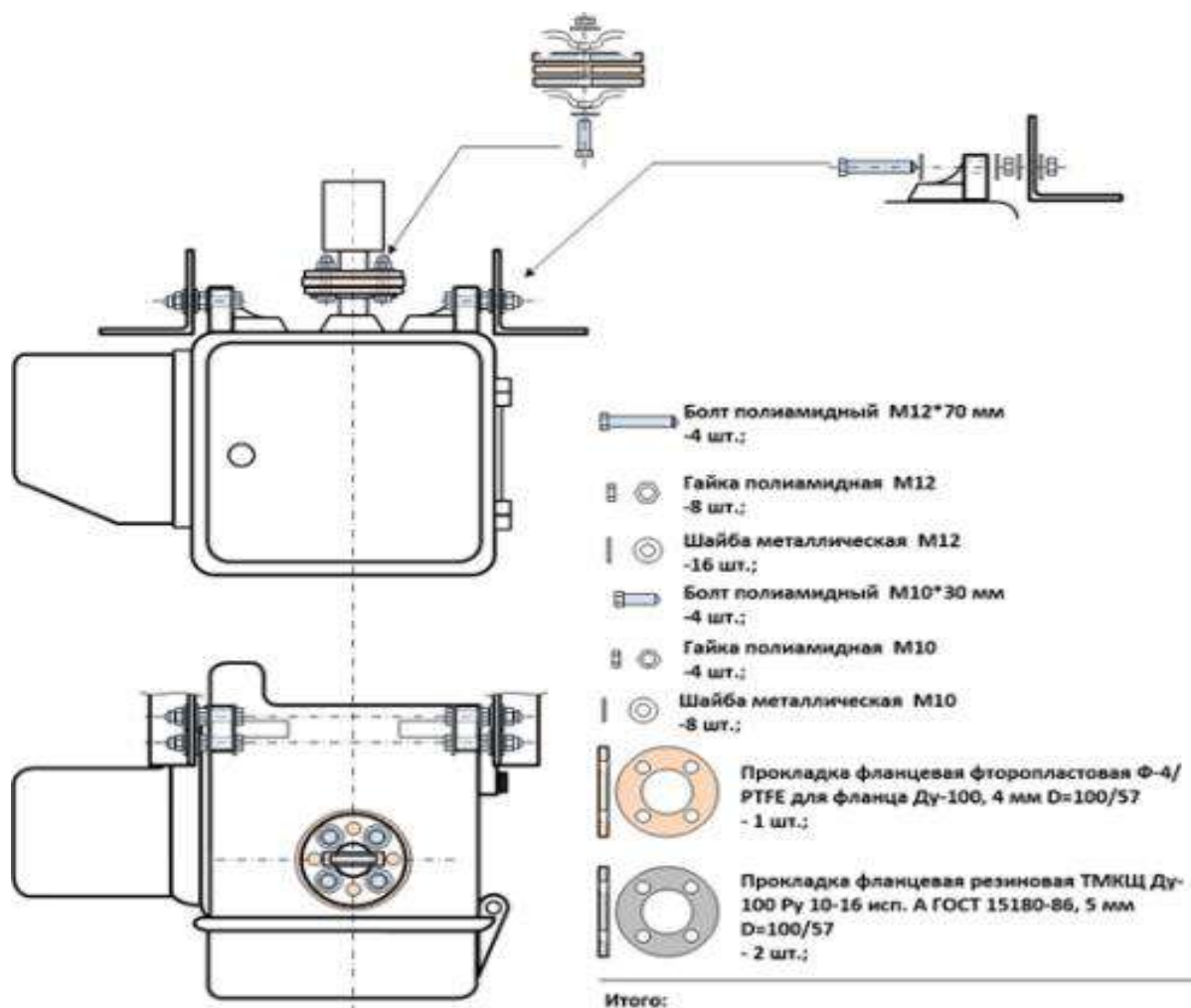


Рис. 5. Конструкция привода, закрепленная на полиамидные крепежи

Fig. 5. Drive design secured with polyamide fasteners

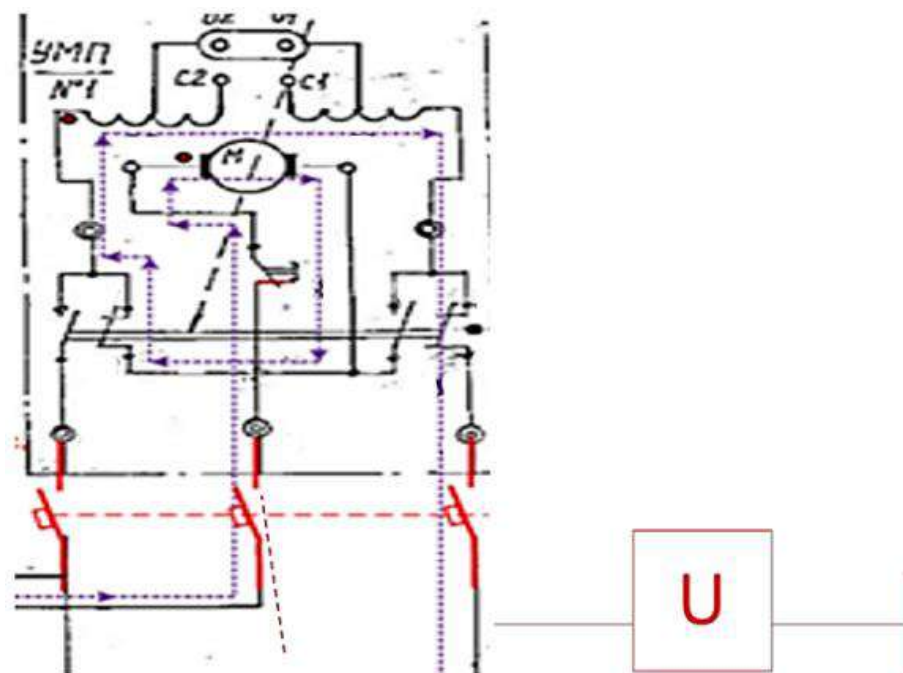


Рис. 6. Схема подключения реле типа РН-111  
 Fig. 6. Wiring diagram for the relay of RN-111 type

При появлении сверхдопустимого потенциала, опасного для изоляции вторичной коммутации, происходит быстродействующее отключение питающих проводов, что позволяет исключить развитие повреждения и «самоходы» разъединителей, даже при повреждении внутренней изоляции привода.

4. Перенос стоек ТУ-ДУ и пультов дистанционного управления на минимально безопасное расстояние к приводам и схемные решения по заземлению приводов на РЦ.

Как было указано ранее, напряжение на элементах вторичной коммутации напрямую зависит от следующих факторов:

- величины тока короткого замыкания;
- расстояния (длины кабеля управления) от пульта ДУ до привода;
- схемы заземления привода на РЦ.

Уменьшить токи короткого замыкания в условиях эксплуатации до безопасных величин не представляется возможным.

Сокращение расстояния от пульта до привода приводит к значительному снижению уровня напряжения и, как следствие, уменьшению вероятности повреждения устройств ТУ-ДУ. Так, при средних токах 5 кА и эквивалентном сопротивлении двойной РЦ 0,2 Ом/км с расстоянием до привода 1 000 м, напряжение

на вторичной коммутации составит:

$$U = I_{кз} \cdot L \cdot Z_{уд},$$

$$U = 5000 \cdot (1 \cdot 0,2) = 1\,000 \text{ В.}$$

где  $I_{кз}$  – ток короткого замыкания, А;  $L$  – расстояния до привода, км;  $Z_{уд}$  – сопротивление двойной РЦ, Ом/км.

При сокращении расстояния до 50 метров падение напряжения на участке РЦ составит:

$$U = 5\,000 \cdot (0,05 \cdot 0,2) = 50 \text{ В,}$$

что безопасно для изоляции цепей.

Однако перенос пультов и стоек ТУ к приводам является достаточно трудоемким мероприятием, требующим организации цепей питания, подвода линий связи и корректировок алгоритмов управления на диспетчерских пунктах. Данное эффективное мероприятие следует применять в исключительных случаях, когда проведение иных мероприятий недостаточно эффективно либо физически невозможно.

Схема заземления привода на РЦ оказывает кратное влияние на уровни напряжений за счет растекания токов короткого замыкания по РЦ. При заземлении на одиночный рельс и возникновении повреждения изоляции КС с транзитом тока короткого замыкания через этот же рельс, расположенный с полевой стороны, уровень напряжения максимален. При заземлении на среднюю точку специально установленного

либо близкорасположенного путевого ДТ, ток короткого замыкания, распределяясь по двум рельсам, вызывает увеличение напряжения вдвое меньше. При заземлении на среднюю точку междупутной перемычки ток распределяется по четырем рельсовым нитям, а уровень напряжения уменьшается приблизительно в 4 раза, что исключает вероятность повреждения.

Таким образом, заземление приводов на близко расположенные путевые ДТ и междупутные перемычки является эффективной и малозатратной мерой защиты устройств ТУ-ДУ от повреждений в аварийных режимах.

### Заключение

В ходе выполнения исследования изучены и разработаны меры по защите устройств ТУ-ДУ в аварийных режимах и защите мачтовых разъединителей КС и ВЛ от «самохода».

В результате анализа состояния цепей ДУ выявлено, что большая часть из них не обеспечивает полной защиты от возможных аварийных ситуаций и не гарантирует сохранность оборудования.

С целью оценки значений тока короткого замыкания в КС использован ПВК «Кортэс». Для определения величины напряжения в точке короткого замыкания и относительно «удален-

ной земли» разработана модель замыкания КС на рельс в ПВК Fazonord.

С учетом проведенных исследований разработаны меры по защите устройств ТУ-ДУ и мачтовых разъединителей КС и ВЛ от «самохода». Они включают в себя следующее:

- усиление изоляции вторичной коммутации;
- изоляция конструкций разъединителей и приводов от низкоомных опор;
- применение защиты от перенапряжений в цепях ДУ;
- перенос стоек ТУ и пультов ДУ на минимальное безопасное расстояние к приводам и использование схемных решений по заземлению приводов на РЦ.

Применение разработанных мер обеспечит надежное функционирование устройств ТУ-ДУ и мачтовых разъединителей КС и ВЛ в аварийных режимах, а также их защиту от возможного «самохода», что приведет к повышению надежности работы системы тягового электроснабжения в целом и к снижению эксплуатационных расходов, связанных с восстановлением нормальной работы устройств ТУ-ДУ и мачтовых разъединителей КС и ВЛ.

### Список литературы

1. Плотников И.И. Обнаружение неисправностей в системе тягового электроснабжения // Железнодорожный транспорт. 2023. № 8. С. 45–47.
2. Урлапов С.С., Крапивин М.И. Анализ повреждаемости электрооборудования тяговых подстанций на Восточно-Сибирской железной дороге // Молодая наука Сибири. 2023. № 2 (20). С. 106–114. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1290/951> (Дата обращения 18.03.2024).
3. Худоногов И.А. Причины повреждаемости силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций ВСЖД // Техничко-экономические проблемы развития регионов : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2022. Т. 25. С. 203–207.
4. 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.
5. Reliability analysis of power equipment of traction rolling stock within the Eastern region / A.M. Khudonogov, I.A. Khudonogov, E.Yu. Dulskiy 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.
6. Вендин С.В. К вопросу о разъединителях электрических цепей // Органическое сельское хозяйство : проблемы и перспективы : материалы XXII междунар. науч.-производ. конф. Майский, 2018. Т. 1. С. 161–163.
7. Макаревич Д.М., Лустенков М.Е., Никитин А.П. Кинематический и динамический анализ привода для переключения контактных разъединителей // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2007. № 7. С. 87–94.
8. Аппаратура управления приводами АУП-5. Техническое описание Ам147.00.000ТО. М. : Московский энергетический завод, 2019. 34 с. URL : <https://mez.ru/wp-content/uploads/2023/12/am147.00.000to-tehnicheskoe-opisanie.pdf> (Дата обращения 01.06.2024).
9. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized diagnostic parameter for condition assessment of power transformer windings insulation // International Russian Automation Conference. 2019. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
10. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). М. : Высш. шк., 1984. 438 с.
11. Крюков А.В. Моделирование электрических нагрузок. Иркутск : ИрГУПС, 2004. 64 с.

12. 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.
13. Основы электротехники, микроэлектроники и управления. Теория и расчет. / Ю.А. Комиссаров, Л.С. Гордеев, Д.П. Вент и др. Т. 1. М.: Химия, 2007. 451 с.
14. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высш. шк., 1987. 248 с.
15. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро – Таксимо ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 2. С. 306–310.
16. Курганов В.В., Крышнев Ю.В., Каптуров О.П. Повышение надежности автоматического управления самозапуском синхронных двигателей цифровым реле Sepam 2000 // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. 2009. № 1 (36). С. 49–58.
17. 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.
18. Тришин Д.Н., Вендин С.В. Эксплуатация разъединителей в сетях 6–10 кВ // Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-летию кафедры технической механики конструирования машин. Майский, 2018. С. 545–548.
19. Усовершенствование схемы блока управления электродвигателя малогабаритного стрелочного универсального / К.В. Менакер, А.В. Пультяков, М.В. Востриков и др. // Автоматика на транспорте. 2023. Т. 9. № 4. С. 313–323.
20. Зональная система повышения надежности электрических машин тягового подвижного состава / А.М. Худоногов, В.П. Смирнов, Е.М. Лыткина и др. // Наука и техника транспорта. 2015. № 1. С. 75–78.
21. К повышению надежности устройств контактной сети / А.С. Есауленко, В.П. Ступицкий, В.А. Тихомиров и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 200–205. URL: <http://mnv.irkgups.ru/toma/212-2021> (Дата обращения 18.03.2024).
22. Разработка и исследование малогабаритного привода для высоковольтных разъединителей контактных сетей и систем электрификации железных дорог / Д.М. Макаревич, А.П. Никитин, С.Д. Макаревич и др. // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2006. № 5. С. 100–105.

### References

1. Plotnikov I.I. Obnaruzhenie neispravnostei v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya [Detection of faults in the traction power supply system]. *Zhelezнодороzhnyi transport* [Railway transport], 2023, no. 8, pp. 45–47.
2. Urlapov S.S., Krapivin M.I. Analiz povrezhdaemosti elektrooborudovaniya tyagovykh podstantsii na Vostochno-Sibirskoi zheleznoi doroge [Analysis of damage to electrical equipment of traction substations on the East Siberian Railway]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no. 2 (20), pp. 106–114.
3. Khudonogov I.A. Prichiny povrezhdaemosti silovykh maslonapolnennykh transformatorov tyagovykh podstantsii VSZhD [Causes of damage to power oil-filled transformers of traction substations of East Siberian Railway]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Tekhniko-ekonomicheskie problemy razvitiya regionov»* [Proceedings of a Scientific and Practical Conference with International Participation «Technical and Economic Problems of Regional Development»]. Irkutsk, 2022, vol. 25, pp. 203–207.
4. 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.
5. Khudonogov A.M., Khudonogov I.A., Dul'skii E.Y., Ivanov P.Yu., 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.
6. Vendin S.V. K voprosu o raz'edinitel'nykh elektricheskikh tsepei [On the issue of disconnectors of electric circuits]. *Materiyaly XXII mezhdunarodnoi nauchno-proizvodstvennoi konferentsii «Organicheskoe sel'skoe khozyaystvo: problemy i perspektivy»* [Proceedings of the XXII International scientific and industrial conference «Organic agriculture: problems and prospects»]. Maiskii, 2018, vol. 1, pp. 161–163.
7. Makarevich D.M., Lustenkov M.E., Nikitin A.P. Kinematicheskii i dinamicheskii analiz privoda dlya pereklyucheniya kontaknykh raz'edinitelei [Kinematic and dynamic analysis of a drive for switching contact disconnectors]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering], 2007, no. 7, pp. 87–94.
8. Apparatura upravleniya privodami AUP-5. Tekhnicheskoe opisanie Am147.00.000TO [Drive control equipment AUP-5. Technical description Am147.00.000TO]. Moscow: Moskovskii energomekhanicheskii zavod Publ., 2019. 34 p. Available at: <https://mez.ru/wp-content/uploads/2023/12/am147.00.000to-tehnicheskoe-opisanie.pdf> (Accessed June 1, 2024).
9. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation. *International Russian Automation Conference*, 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
10. Venikov V.A., Venigov G.V. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitel'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.
11. Kryukov A.V. Modelirovanie elektricheskikh nagruzok [Modeling of electrical loads]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2004. 64 p.
12. 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.

13. Komissarov Yu.A., Gordeev L.S., Vent D.P., Babokin G.I. Osnovy elektrotekhniki, 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.
14. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1987. 248 p.
15. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Churo – Taksimo VSZhD [Strengthening the traction power supply system of the Churo – Taksimo section of the Eastern Siberian Railway]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport: science, education, production»]. Rostov-on-Don, 2016, vol. 2, pp. 306–310.
16. Kurganov V.V., Kryshnev Yu.V., Kapturov O.P. Povyshenie nadezhnosti avtomaticheskogo upravleniya samozapuskom sinkhronnykh dvigatelei tsifrovym rele Sepam 2000 [Improving the reliability of automatic self-start control of synchronous motors by digital relay Sepam 2000]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* [Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi], 2009, no. 1 (36), pp. 49–58.
17. 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.
18. Trishin D.N., Vendin S.V. Eksploatatsiya raz'edinitelei v setyakh 6–10 kV [Operation of disconnectors in 6–10 kV networks]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 30-letiyu kafedry tekhnicheskoi mekhaniki konstruirovaniya mashin «Aktual'nye problemy agroinzhenerii v XXI veke»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Actual problems of agroengineering in the XXI century»]. Maikskii, 2018, pp. 545–548.
19. Menaker K.V., Pul'tyakov A.V., Vostrikov M.V., Orlov A.V. Uovershenstvovanie skhemy bloka upravleniya elektrodvigatelya malogabaritnogo strelochnogo 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.
20. Khudonogov A.M., Smirnov V.P., Lytkina E.M., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Garev N.N. Zonal'naya sistema povysheniya nadezhnosti elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Zonal system for improving the reliability of electric traction rolling stock machines]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of transport], 2015, no. 1, pp. 75–78.
21. Esaulenko A.S., Stupitskii V.P., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. K povysheniyu nadezhnosti ustroystv kontaktnoi seti [To increase the reliability of contact network devices]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia]. 2021, no. 2(12), pp. 200–205.
22. Makarevich D.M., Nikitin A.P., Makarevich S.D., Pitkova T.N. Razrabotka i issledovanie malogabaritnogo privoda dlya vysokovol'tnykh raz'edinitelei kontaktnykh setei i sistem elektrifikatsii zheleznykh dorog [Development and research of a small-sized drive for high-voltage disconnectors of contact networks and railway electrification systems]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering], 2006, no. 5, pp. 100–105.

### Информация об авторах

**Пузина Елена Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

**Крапивин Михаил Иванович**, кафедра электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: mihail.krapivin03@gmail.com.

**Куцый Антон Павлович**, начальник Молодежного научного центра, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kutsyi\_ap@irgups.ru.

### Information about the authors

**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.

**Mikhail I. Krapivin**, Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: mihail.krapivin03@gmail.com.

**Anton P. Kutsyi**, Head of the Youth Research Center, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kutsyi\_ap@irgups.ru.

## Способ диагностирования гидравлических гасителей колебаний на тяговом подвижном составе

О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, А.В. Коновалов✉, С.А. Кахаев

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

✉alekseikonovalov2016@mail.ru

### Резюме

В статье описывается важность улучшения характеристик подвижного состава для повышения эффективности железнодорожного транспорта и достижения такой стратегической цели, как увеличение грузооборота. От состояния рессорного подвешивания тягового подвижного состава зависят динамическая нагруженность, износ и повреждаемость его экипажной части, затраты на ремонт и техническое обслуживание, виброзащитенность машинистов. Гидравлический гаситель колебаний является ответственным узлом в подвеске тягового подвижного состава, а наличие дефектного гидравлического гасителя колебаний может привести к сходу тягового подвижного состава, а также способствует повышению износа его элементов, отрицательно воздействует на путь и вызывает необходимость снижения скорости. В работе представлена конструкция рессорного подвешивания первой и второй ступеней, описывается ее назначение и принцип работы гидравлических гасителей колебаний на электровозе серии 3ЭС5К. Приведены существующие методы и способы диагностирования гидравлических гасителей колебаний. С помощью программы MSC Adams произведены расчет и моделирование электровоза серии 3ЭС5К. С учетом полученных результатов можно предположить, что происходит при исправном и неисправном состояниях гидравлических гасителей колебаний. В исследовании также приводится новый метод диагностирования технического состояния гидравлических гасителей колебаний на тяговом подвижном составе с помощью установки датчиков виброускорения на подвижной состав в определенные места по предложенной схеме.

### Ключевые слова

электроподвижной состав, гидравлический гаситель колебаний, диагностика, датчик виброускорения, техническое состояние рессорного подвешивания, рессорное подвешивание, моделирование

### Для цитирования

Способ диагностирования гидравлических гасителей колебаний на тяговом подвижном составе / О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, А.В. Коновалов, С.А. Кахаев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 79–88. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).79-88.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 06.06.2024 г.; поступила после рецензирования: 13.06.2024 г.; принята к публикации: 17.06.2024 г.

### Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственного задания по работе «Проведение прикладных научных исследований» на тему «Разработка цифрового двойника колесно-моторного блока электровоза «Ермак» серии 2(3)ЭС5К» № 124060500020-4 от 5 июня 2024 г. Этап 1: «Цифровой двойник колесно-моторного блока электровоза серии «Ермак» для увеличения пропускной способности Восточного полигона при реализации тяжеловесного движения».

## A method for diagnosing hydraulic vibration dampers on traction rolling stock

O.V. Mel'nichenko, A.O. Lin'kov, A.V. Konvalov✉, S.A. Kakhaev

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

✉alekseikonovalov2016@mail.ru

### Abstract

The article describes the importance of improving the characteristics of rolling stock in order to increase the efficiency of railway transport and achieve strategic goals such as increasing freight turnover. The condition of the spring suspension of traction rolling stock determines the dynamic loading, wear and damage to its undercarriage part, repair and maintenance costs, as well as the vibration protection of the drivers. The hydraulic vibration damper is an important node in the suspension of the traction rolling stock, and the presence of a defective hydraulic vibration damper can result in a derailment of the traction rolling stock, as well as increase the wear of the elements of the traction rolling stock, negatively affect the path and lead to the need to reduce speed. The design and purpose of the spring suspension of the first and second stages, as well as the principle of operation of hydraulic vibration dampers on an electric locomotive of the 3ES5K series, are described. The existing methods and methods for diagnosing hydraulic vibration dampers are presented. With the help of the MSC Adams program, the calculation and modeling of the



3ES5K series electric locomotive was performed. Based on the results obtained, it can be seen what happens when the hydraulic vibration dampers are in good working order and when faulty. The article describes a new method for diagnosing the technical condition of hydraulic vibration dampers on traction rolling stock by installing vibration acceleration sensors on the rolling stock in definite locations, with the layout of the sensors also given.

### Keywords

electric rolling stock, hydraulic vibration dampener, diagnostics, vibration acceleration sensor, technical condition of spring suspension, spring suspension, modeling

### For citation

Mel'nichenko O.V., Lin'kov A.O., Kononov A.V., Kakhaev S.A. Sposob diagnostirovaniya gidravlicheskih gasitelei kolebaniy na tyagovom podvizhnom sostave [A method for diagnosing hydraulic vibration dampers on traction rolling stock]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 79–88. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).79-88.

### Article Info

Received: June 6, 2024; Revised: June 13, 2024; Accepted: June 17, 2024.

### Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state assignment for the work «Conducting applied scientific research» on the topic «Development of a digital twin of the wheel-motor unit of the Ermak electric locomotive series 2(3)ES5K» No 124060500020-4 dated June 5, 2024 Stage 1: «Digital twin of the wheel-motor unit of the Ermak series electric locomotive to increase the capacity of the Eastern landfill during the implementation of heavy traffic».

### Введение

В современных условиях железнодорожный транспорт играет ключевую роль в экономике России. Одной из важных задач стратегических документов ОАО «РЖД» является повышение грузооборота сети железных дорог к 2025 г. на 42 % [1].

Одним из способов достижения поставленной цели является повышение надежности и улучшение технического обслуживания и ре-

монта. Поэтому важными являются вопросы улучшения характеристик тягового подвижного состава, его надежности и ремонтпригодности, а также сокращения времени простоя на техническом обслуживании и ремонте.

Цель статьи заключается в исследовании рессорного подвешивания электровоза серии 3ЭС5К, а именно гидравлических гасителей колебаний в среде моделирования MSC Adams.

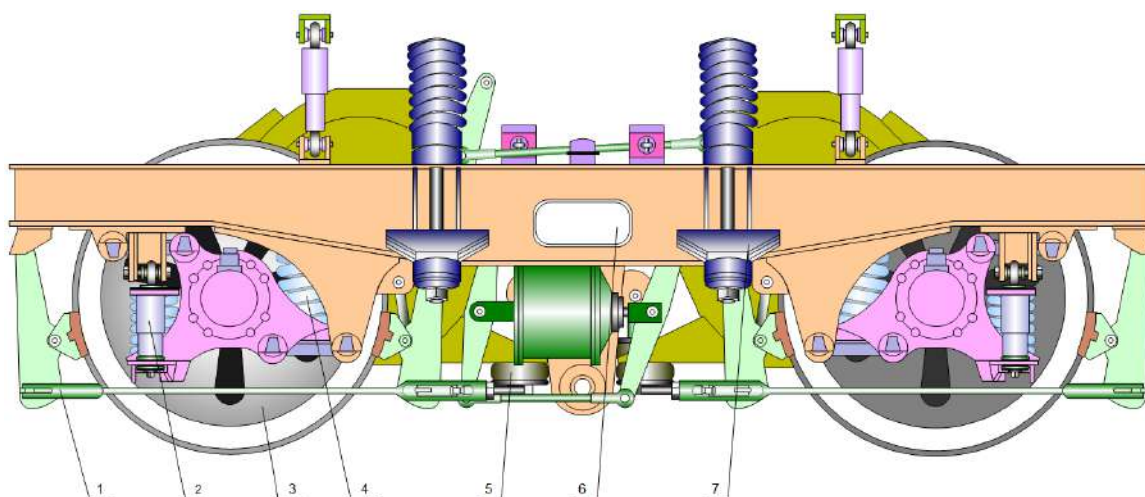


Рис. 1. Тележка электровоза серии 3ЭС5К:

1 – система тормозная; 2 – гидравлический гаситель колебаний; 3 – пара колесная; 4 – рессорное подвешивание; 5 – подвеска тягового электродвигателя; 6 – рама тележки; 7 – люльчатое подвешивание; 8 – система смазки гребней

Fig. 1. Bogie of the 3ES5K series electric locomotive:

1 – braking system; 2 – hydraulic vibration dampener; 3 – wheelset; 4 – spring suspension; 5 – traction electric motor suspension; 6 – bogie frame; 7 – cradle suspension; 8 – comb lubrication system

### Конструкция рессорного подвешивания

Рессорное подвешивание первой ступени предназначено для равномерного распределения по буксам колесных пар весовых нагрузок от рам тележек и для уменьшения динамических сил, передаваемых колесными парами на надрессорное строение при прохождении экипажем тягового подвижного состава неровностей пути [2]. На рис. 1 представлена тележка электровоза серии 3ЭС5К.

Рессорное подвешивание первой ступени в соответствии с рис. 2 состоит из пружин 4, втулок 2 и регулировочных прокладок 3, 4. Пружины устанавливаются на приливы корпуса буксы. Верхняя часть крайней пружины через втулку и регулировочные прокладки упирается в кронштейн 1, который, в свою очередь, крепится к раме тележки тремя болтами М20. Верхняя часть другой пружины опирается непосредственно на опорную площадку прилива большого буксового кронштейна.

Гидравлические гасители колебаний предназначены для установки в систему рессорного подвешивания тягового подвижного состава с целью обеспечения нормируемых показателей плавности хода и воздействия на рельсовый путь [3–5].

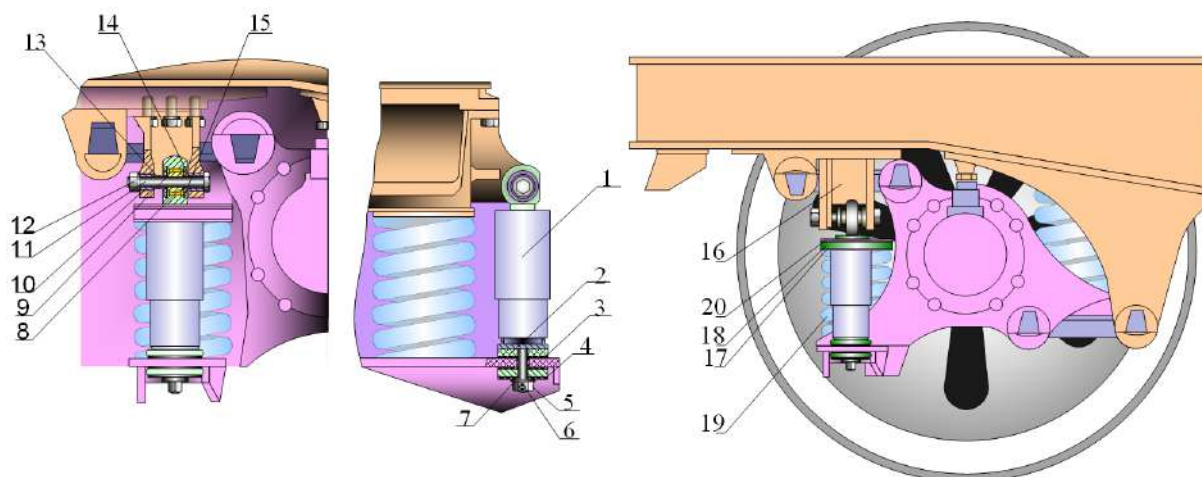
На каждой тележке электровоза 3ЭС5К в соответствии с рис. 2 установлено по четыре

буксовых гидравлических гасителя колебаний.

Гидравлический гаситель колебаний работает параллельно с пружинами рессорного подвешивания. Он установлен вертикально между кронштейнами корпуса буксы и рамы тележки по одному на каждой буксе.

Рессорное подвешивание второй ступени предназначено для передачи вертикальных и поперечных сил от кузова на раму тележки, уменьшения величины горизонтального и вертикального воздействия тягового подвижного состава на путь [6]. Рессорное подвешивание второй ступени в соответствии с рис. 3 представляет собой стержень 10, к нижней части которого приложена вертикальная нагрузка от кузова. Кузов кронштейнами 1 через балансир 11 устанавливается на нижний шарнир рессорного подвешивания второй ступени, состоящий из опор 12, 14 и прокладки 13. Нижний шарнир удерживается на стержне гайкой 15, которая стопорится крючком 18.

Вертикальная нагрузка через регулировочную шайбу 3, стержень 10, пружину 4, шайбу 6, фланец стакана 5 и верхний шарнир, состоящий из двух опор 7 и прокладки 13, передается на кронштейн 8 рамы тележки. Шарниры рессорного подвешивания второй ступени обеспечивают колебательное движение стержня, вызванное горизонтальным поперечным



**Рис. 2.** Рессорное подвешивание первой ступени электровоза серии 3ЭС5К:

1 – гидравлический гаситель колебаний; 2 – амортизатор; 3, 4, 6 – шайба; 5 – гайка; 7 – шплинт; 8 – шарнирный подшипник; 9 – фторопластовое кольцо; 10, 17 – втулка; 11 – валик; 12 – гайка; 13, 14 – втулка дистанционная; 15 – стопорное кольцо; 16 – кронштейн; 18, 20 – прокладка; 19 – пружина; 21 – планка

**Fig. 2.** Spring suspension of the first stage of the 3ES5K series electric locomotive:

1 – hydraulic vibration dampers; 2 – shock absorber; 3, 4, 6 – washer; 5 – nut; 7 – cotter pin; 8 – articulated bearing; 9 – fluoroplastic ring; 10, 17 – sleeve; 11 – roller; 12 – nut; 13, 14 – remote bushing; 15 – locking ring; 16 – bracket; 18, 20 – gasket; 19 – spring; 21 – bar

перемещением кузова и поворотом тележки относительно кузова.

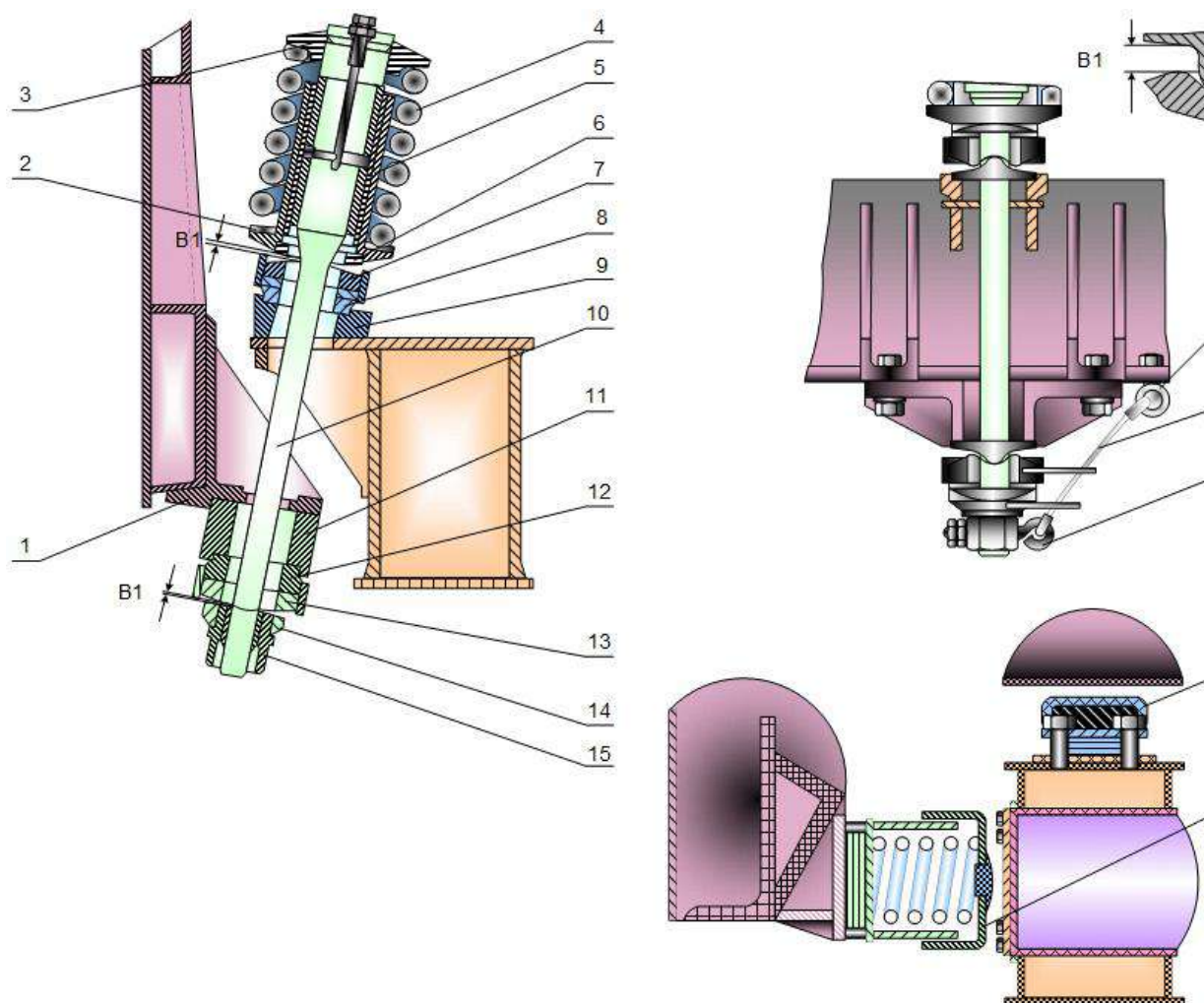
Горизонтальные усилия от кузова на тележку передаются рессорным подвешиванием второй ступени при поперечном отклонении кузова до 15 мм от среднего положения и люлечными подвесками в параллель с горизонтальным упором при перемещении кузова от 15 до 30 мм. После сжатия пружины горизонтального упора на рабочий ход 15 мм упор работает как жесткий ограничитель [7, 8].

### Актуальность проблемы

От состояния рессорного подвешивания тягового подвижного состава зависит динами-

ческая нагруженность, износ и повреждаемость его экипажной части, затраты на ремонт и техническое обслуживание, а также виброзащитенность машинистов. Гидравлический гаситель колебаний является ответственным узлом в подвеске тягового подвижного состава, а наличие дефектного гидравлического гасителя колебаний может привести к сходу тягового подвижного состава, а также способствует повышению износа его элементов, отрицательно воздействует на путь и вызывает необходимость снижения скорости.

В современных электровозах для первой и второй ступени рессорного подвешивания применяются цилиндрические пружины, кото-



**Рис. 3.** Рессорное подвешивание второй ступени:

1 – кронштейн; 2, 3, 6, 8 – шайба; 4 – пружина; 5 – стакан; 7 – опора; 9 – кронштейн; 10 – стержень; 11 – балансир; 12, 14 – опора; 13 – прокладка; 15 – гайка; 16 – болт; 17 – трос; 18 – крюк; 19 – вертикальный упор; 20 – горизонтальный упор

**Fig. 3.** Spring suspension of the second stage:

1 – bracket; 2, 3, 6, 8 – washer; 4 – spring; 5 – cup; 7 – support; 9 – bracket; 10 – rod; 11 – balancer; 12, 14 – support; 13 – gasket; 15 – nut; 16 – bolt; 17 – cable; 18 – hook; 19 – vertical stop; 20 – horizontal stop

рые имеют ряд преимуществ перед листовыми рессорами. Однако их основной недостаток заключается в отсутствии сил сопротивления, необходимых для уменьшения или ограничения амплитуд колебаний кузова и тележек электровоза. Поэтому в таких случаях обязательно устанавливаются специальные гидравлические гасители колебаний, способные преобразовывать механическую энергию колебательного процесса в тепловую и рассеивать ее в окружающую среду. В настоящее время в конструкции подвешивания современных электровозов применяются гидравлические гасители колебаний.

На сегодняшний день ведется множество работ по реализации умного локомотива и умного депо, которые требуют максимальной информации о техническом состоянии всех основных узлов тягового подвижного состава.

Актуальность проблемы подтверждается частым выявлением течи гидравлических гасителей колебаний при визуальном осмотре в процессе эксплуатации и техническом обслуживании. Для исследования был взят пункт технического осмотра локомотивов на ст. Большой Луг. При осмотре толкача было обнаружено более 60 % потекших гидравлических гасителей колебаний. На рис. 4 представлено фото электровоза серии 3ЭС5К № 128 и потекшие гидравлические гасители колебаний.

#### Существующие методы и технологии диагностирования гидравлических гасителей колебаний

Для диагностики состояния гидравлических гасителей колебаний на тяговом подвижном составе применяются различные методы и



*а*



*б*

**Рис. 4.** Электровоз серии 3ЭС5К № 128 (*а*) и потекшие гидравлические гасители колебаний (*б*)  
**Fig. 4.** 3ES5K series electric locomotive No 128 and leaking hydraulic vibration dampers

технологии, одним из которых является визуальный осмотр, позволяющий выявить видимые дефекты и повреждения. Кроме того, проводится анализ характеристик колебаний на существующих специализированных стендах для диагностики гидравлических гасителей колебаний [9–13]. Способы предполагают демонтаж гидравлических гасителей колебаний с тягового подвижного состава на позициях текущего ремонта с последующей установкой на испытательный стенд. На стенде гидравлические гасители колебаний подвергаются различным видам нагрузок в течение испытательного времени. После испытаний формируются рабочие диаграммы и отчет о результатах диагностики гидравлических гасителей колебаний, на основании которых делается заключение об их работоспособности.

Недостаток способов заключается в том, что невозможно оперативно реализовать диагностику гидравлических гасителей колебаний без демонтажа с тягового подвижного состава.

### Принцип работы гидравлического гасителя колебаний

Принцип работы гидравлического гасителя колебаний заключается в последовательном перемещении вязкой жидкости поршнем через узкие каналы. При прохождении жидкости через эти каналы возникает вязкое трение.

На рис. 5, а показана двухмассовая система с гидравлическими гасителями колебаний, имеющими постоянные вязкого демпфирования  $c_1$  и  $c_2$  [14]. Если к системе не приложены нагрузки, уравнения движения в усилиях имеют вид (рис. 5, б):

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -c_1 \dot{x}_1 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1); \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2 (x_2 - x_1). \end{aligned}$$

В матричных обозначениях эти уравнения запишутся так:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + SX = 0, \quad (1)$$

где

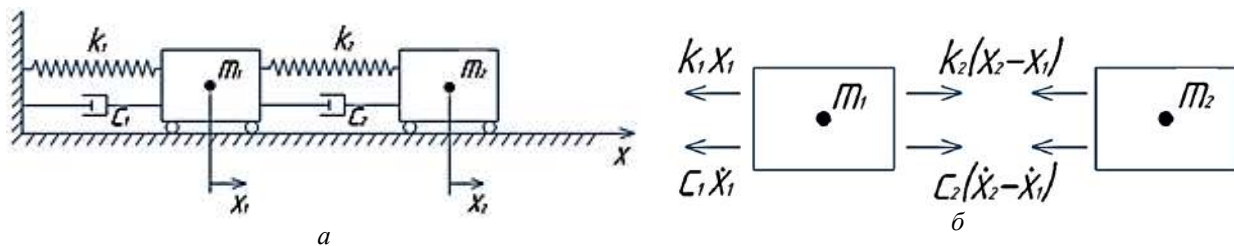


Рис. 5. Двухмассовая система с гидравлическими гасителями колебаний (а) и при отсутствии нагрузок (б)  
Fig. 5. Two-mass system with hydraulic vibration dampers (a) and in the absence of loads (b)

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix}, \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}.$$

Матрица демпфирования  $C$  состоит из коэффициентов влияния демпфирования, которые можно рассматривать как силы, необходимые для получения единичных скоростей. Таким образом, произвольный элемент  $C_{ij}$  матрицы коэффициентов влияния вязкого демпфирования представляет собой действие демпфирования, соответствующее единичной скорости типа  $j$ . Это определение аналогично тому, которое давалось применительно к коэффициентам влияния жесткости и инерции, и процедура определения элементов столбцов матрицы  $C$  аналогична той, которая описана ранее применительно к матрицам  $S$  и  $M$ . Если следовать указанной процедуре, матрица демпфирования будет всегда симметричной.

Поскольку в уравнении (1) присутствуют члены, обусловленные влиянием скорости, то и решение однородных дифференциальных уравнений будет более сложным, чем для колебаний без демпфирования. Решение системы содержит как минимум три дифференциальных уравнения второго порядка с одной стороны электровоза, поэтому точного аналитического решения не будет, в связи с чем используем систему моделирования для анализа частных решений.

Также следует учитывать широкополосные колебания, возможные в кривых малого радиуса с силой до 10g и частотой до 500 Гц, что приводит к достаточно резкому росту количества отказов гидравлических гасителей колебаний у толкачей на горно-перевальном участке.

### Моделирование

Для того чтобы посмотреть, как меняет свое поведение тяговый подвижной состав, была спроектирована одна секция электровоза серии ЗЭС5К и железнодорожный путь в среде

моделирования MSC Adams [15, 16].

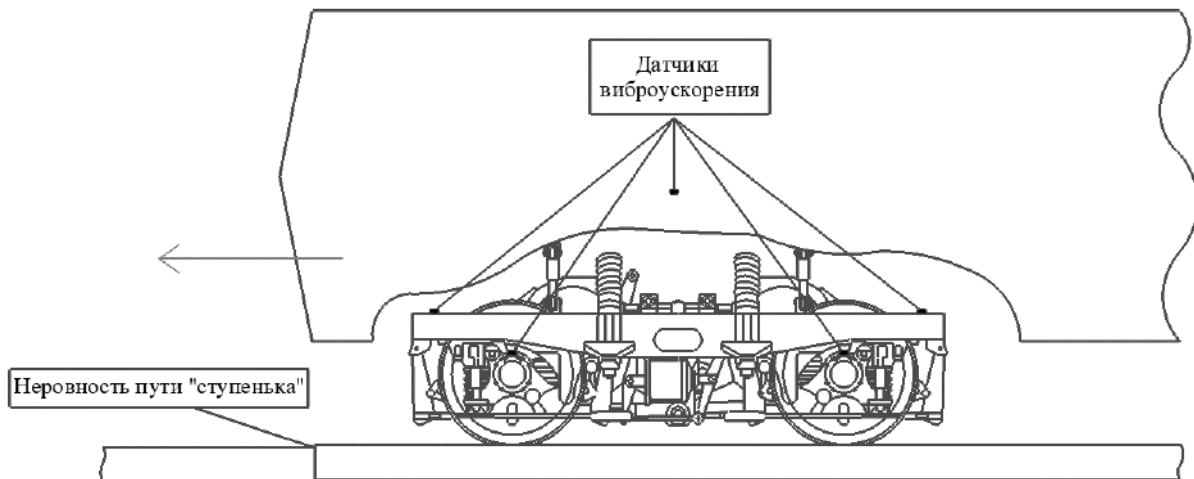
На рис. 6 представлена схема расположения датчиков вибрации и неровность пути «ступенька».

При проектировании локомотивов необходимо оценивать и выбирать оптимальные характеристики рессорного подвешивания для обеспечения их динамических свойств. Для этого используются специальные программы, которые позволяют проводить компьютерное моделирование движения поезда по прямым и кривым участкам пути с учетом различных факторов, таких как неровности пути и наклоны рельсов. Эти программы также позволяют одновременно рассчитывать ускорения, скорости и перемещения различных элементов конструкции локомотива [17].

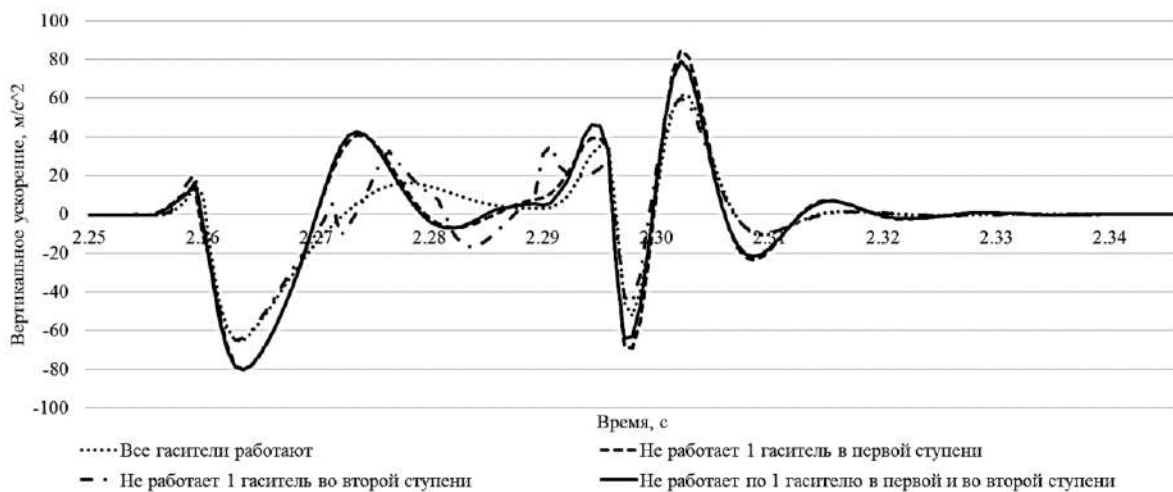
По модели секции электровоза серии 3ЭС5К был произведен расчет системой MSC Adams и построены графики зависимости вертикального ускорения от времени для букс и кузова электровоза, углового ускорения от времени для тележки. Для наглядности объединены четыре графика с разными параметрами гидравлических гасителей колебаний. Графики приведены на рис. 7–9.

### Способ диагностирования

Предлагается новый способ диагностирования технического состояния гидравлических гасителей колебаний тягового подвижного состава, при котором устанавливаются датчики виброускорения на узлы тягового подвижного состава, сигнал с которых считывается, преоб-



**Рис. 6.** Модель одной секции электровоза серии 3ЭС5К и расположение датчиков вибрации  
**Fig. 6.** Model of one section of the 3ES5K series electric locomotive and the location of vibration sensors



**Рис. 7.** Зависимость вертикального ускорения от времени для буксы  
**Fig. 7.** Dependence of vertical acceleration on time for the axle box

разуется и сравнивается с эталонным, после чего на основании сравнения делается вывод о техническом состоянии диагностируемого узла, при этом один или несколько датчиков виброускорения устанавливаются отдельно на буксы, тележку и кузов тягового подвижного состава, а анализ сигнала выполняется при проезде тяговым подвижным составом неровности пути – «ступеньки».

Предлагаемый способ обоснован на выборе входных диагностических параметров нейронной распознающей сети для диагностирования технического состояния гидравлического гасителя колебаний. Разработана и обос-

нована топология и параметры нейронной сети, осуществляющей идентификацию вида неисправности гидравлического гасителя колебаний. На основании выполненных теоретических исследований реализована методика диагностирования технического состояния гидравлических гасителей колебаний в условиях локомотивного депо. Разработаны программные методы формирования входных диагностических параметров и выходных диапазонов [18].

### Заключение

В результате проведенного исследования в программе MSC Adams были получены дан-

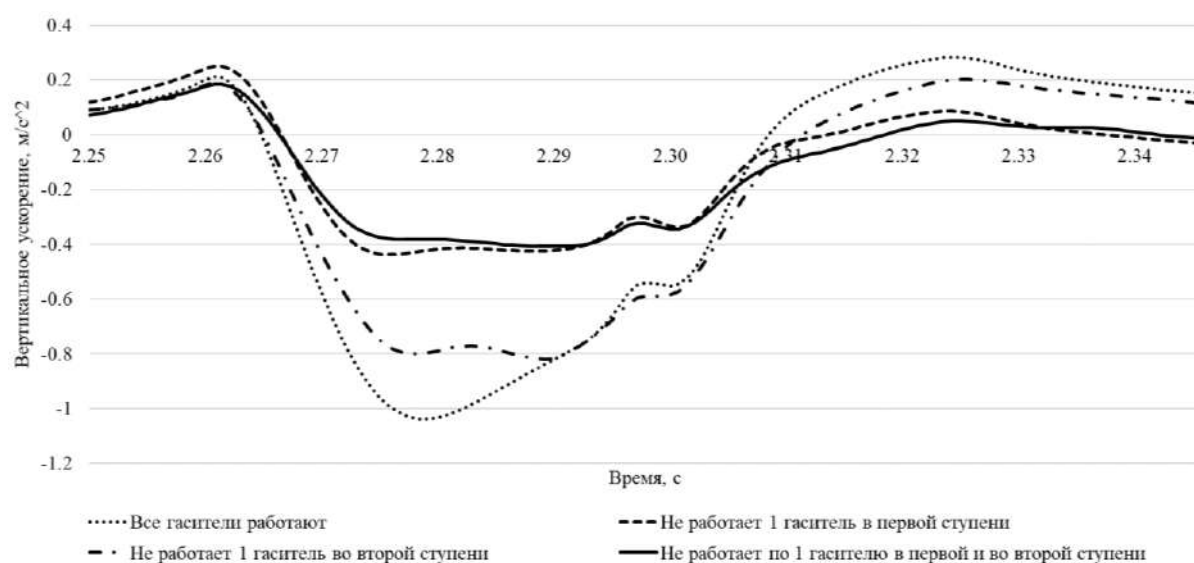


Рис. 8. Зависимость вертикального ускорения от времени для кузова

Fig. 8. Dependence of vertical acceleration on time for the body

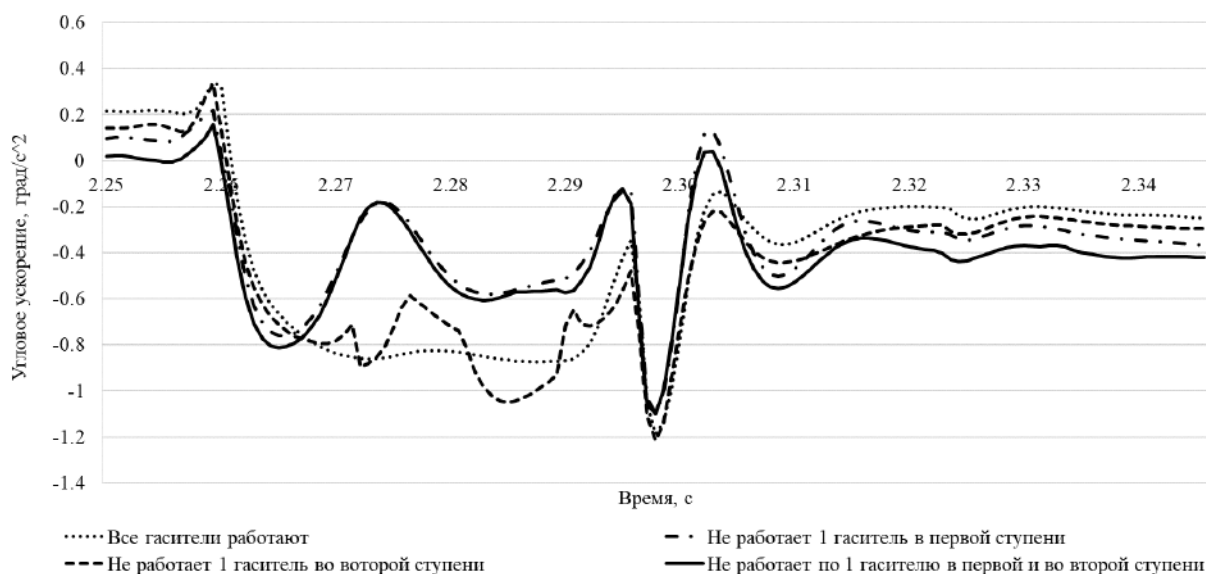


Рис. 9. Зависимость углового ускорения от времени для тележки

Fig. 9. Dependence of angular acceleration on time for a bogie

ные, которые демонстрируют влияние технического состояния гидравлических гасителей колебаний на движение тягового подвижного состава. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что техническое состояние элементов подвески оказывает существенное воздействие на характеристики движения и поведение тягового подвижного состава.

Предложенный в ходе данной работы способ диагностики технического состояния гидравлических гасителей колебаний тягового по-

движного состава открывает новые возможности для оценки их технического состояния непосредственно в условиях эксплуатации. Это позволит своевременно выявлять возникающие неисправности или отклонения в работе гидравлических гасителей колебаний, что повысит безопасность движения тягового подвижного состава. Данная работа является важным техническим решением в рамках создания цифрового двойника колесно-моторного блока электровоза 3ЭС5К.

### Список литературы

1. Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : распоряжение ОАО «РЖД» № 769/р от 17.04.2018 г. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
2. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К, 4ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Кн. 6. Механическая часть. ИДМБ.661142.009РЭ6 (ЗТС 001.012 РЭ6). Новочеркасск : Новочеркас. электровозостроител. завод, 2004. 66 с.
3. Руководство по эксплуатации 677.00 РЭ. Демпферы гидравлические подвижного состава железных дорог. Первомайск : Транспневматика, 2008. 69 с.
4. Челноков И.И. Гидравлические гасители колебаний пассажирских вагонов. М. : Транспорт, 1975. 73 с.
5. Руководство по техническому обслуживанию и ремонту гидравлических и фрикционных гасителей колебаний локомотивов ПКБ ЦТ.25.0113. М. : ПКБ ЦТ, 2011. 250 с.
6. Электровоз ВЛ85 : Руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.Г. Пушкарев, Л.А. Позднякова и др. М. : Транспорт, 1992. 480 с.
7. Электровоз ВЛ80р. Руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканова, Н.М. Васько, В.И. Покромкин и др. М. : Транспорт, 1985. 541 с.
8. Механическая часть тягового подвижного состава / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др. М. : Транспорт, 1992. 440 с.
9. Стенд испытания гидравлических гасителей колебаний // ТПИ : сайт. URL : <https://tpiomsk.ru/catalog/oborudovanie-dlya-remonta-zheleznodorozhnogo-transporta/lokomotivnoe/stend-ispytaniya-gidravlicheskih-gasiteley-kolebaniy/> (дата обращения 30.05.2024).
10. Болобонов С.И. Стенд для испытания гидродемпферов тягового подвижного состава // Локомотив. 2023. № 4. С. 10–11.
11. Пат. 7201 Рос. Федерация. Стенд для испытания гасителей колебаний вагонов и локомотивов / Ю.П. Бороненко, В.И. Варава, Г.М. Левит. № 97110618/20 ; заявл. 24.06.1997 ; опубл. 16.07.1998.
12. Пат. 102798 Рос. Федерация. Стенд снятия нагрузочной характеристики гидродемпфера / Е.Г. Борисов, А.В. Голубев, В.С. Усс. № 2010141222/28 ; заявл. 07.10.2010 ; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7. 2 с.
13. Пат. 2556768 Рос. Федерация. Универсальный стенд для испытания гасителей колебаний / В.А. Каньшин, А.М. Третьяков, Ф.П. Мельников и др. № 2013149886/11 ; заявл. 07.11.2013 ; опубл. 20.05.2015, Бюл. № 20. 12 с.
14. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М. : Машиностроение, 1985. 472 с.
15. Иванов А.А. MSC.Adams: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования. М. : MSC.Software Corporation, 2003. 97 с.
16. Марченко Д.М. Создание компьютерной модели вагона для динамического моделирования в MSC.ADAMS // Механика. Исследования и инновации. 2017. № 10. С. 148–156.
17. ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. Введ. 2014–07–01. М. : Стандартинформ, 2014. 46 с.
18. Шкодун П.К. Диагностирование технического состояния гидравлических гасителей колебаний при ремонте и обслуживании подвижного состава : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2002. 21 с.

### References

1. Rasporiyazhenie ОАО «RZhD» № 769/r ot 17.04.2018 g «Ob utverzhdenii strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 g. i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga)» [Order of JSC Russian Railways No 769/r dated April 17, 2018 «On approval of the strategy of scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book)»].
2. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 6. Mekhanicheskaya chast'. IDMB.661142.009RE6 (ZTS 001.012 RE6) [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K, 4ES5K). User manual. Book 6. The mechanical part. IDMB.661142.009RE 6 (ZTS 001.012 RE6)]. NovoCherkassk: NovoCherkasskii elektrovozostroitel'nyi zavod Publ., 2004. 66 p.
3. Rukovodstvo po ekspluatatsii 677.00 RE. Dempfery gidravlicheskie podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Operating manual 677.00RE. Hydraulic dampers of railway rolling stock]. Pervomaisk: Transpnevmatika Publ., 2008. 69 p.



4. Chelnokov I.I. *Gidravlicheskie gasiteli kolebanii passazhirskikh vagonov* [Hydraulic vibration dampers of passenger wagons]. Moscow: Transport Publ., 1975. 73 p.
5. *Rukovodstvo po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu gidravlicheskikh i friktsionnykh gasitelei kolebanii lokomotivov PKB TsT.25.0113* [Maintenance and repair manual for hydraulic and friction vibration dampers of locomotives PKB TsT 25.0113]. Moscow: PKB TsT Publ., 2011. 250 p.
6. Tushkanov B.A., Pushkarev N.G., Pozdnyakova L.A., Yarosh V.P., Sobolev Yu.V., Matlakhov A.A., Ukrainskii E.V., Andryushchenko T.F., Krivun A.A., Strel'tsov A.I., Mikheev B.K., Orlov Yu.A., Parichenko N.A., Zakis' E.A., Shtepenko P.K., Shestakov E.F. *Elektrovoz VL85: Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive VL85. Operation manual]. Moscow: Transport, 1992. 480 p.
7. Tushkanov B.A., Vas'ko N.M., Pokromkin V.I., Matlakhov A.A., V.K. Mikheev, Nazin V.V., Orlov M.P., Popov V.I., Poltorak P.S., Poludnenko A.N., Sobolev Yu.V., Korbut E.A., Chaika A.M., Strel'tsova T.V. *Elektrovoz VL80r. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive VL80r. User manual]. Moscow: Transport Publ., 1985. 541 p.
8. Biryukov I.V., Savos'kin A.N., Burchak G.P., Serdobintsev E.V., L'vov N.V., Korotenko M.L., Rybnikov E.K., Derkach B.A. *Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava* [The mechanical part of traction rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1992. 440 p.
9. *Stend ispytaniya gidravlicheskikh gasitelei kolebanii (Elektronnyi resurs)* [Test bench for hydraulic vibration dampers (Electronic resource)]. Available at: <https://tpiomsk.ru/catalog/oborudovanie-dlya-remonta-zheleznodorozhnogo-transporta/lokomotivnoe/stend-ispytaniya-gidravlicheskikh-gasiteley-kolebanii/> (Accessed May 30, 2024).
10. Bolobonov S.I. *Stend dlya ispytaniya gidrodempferov tyagovogo podvizhnogo sostava* [Test bench for hydraulic dampers of traction rolling stock]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2023, no. 4, pp. 10–11.
11. Boronenko Yu.P., Varava V.I., Levit G.M. Patent RU 7201 U1, 16.07.1998.
12. Borisov E.G., Golubev A.V., Uss V.S. Patent RU 102798 U1, 10.03.2011.
13. Kan'shin V.A., Tret'yakov A.M., Mel'nikov F.P., Belyaev V.I. Patent RU 2556768 C2, 20.07.2015.
14. Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W, Jr. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibration Problems in Engineering]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1985. 472 p.
15. Ivanov A.A. *MSC.Adams: teoriya i elementy virtual'nogo konstruirovaniya i modelirovaniya* [Theory and elements of virtual construction and modeling]. Moscow: MSC.Software Corporation Publ., 2003. 97 p.
16. Marchenko D.M. *Sozдание komp'yuterno modeli vagona dlya dinamicheskogo modelirovaniya v MSC.ADAMS* [Creation of a computer model of a wagon for dynamic modeling in MSC.ADAMS]. *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii* [Mechanics. Research and innovation], 2017, no. 10, pp. 148–156.
17. GOST R 55513-2013. *Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [State Standard R 55513-2013 Locomotives. Requirements for strength and dynamic properties]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 46 p.
18. Shkodun P.K. *Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya gidravlicheskikh gasitelei kolebanii pri remonte i obsluzhivani podvizhnogo sostava* [Diagnosis of the technical condition of hydraulic vibration dampers during repair and maintenance of rolling stock]. Ph.D.'s theses. Omsk, 2002. 21 p.

### Информация об авторах

**Мельниченко Олег Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Линьков Алексей Олегович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: linkovalex@mail.ru.

**Коновалов Алексей Владимирович**, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: alekseikonov2016@mail.ru.

**Кахаев Семен Александрович**, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vip.kakhaev@mail.ru.

### Information about the authors

**Oleg V. Mel'nichenko**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Alexei O. Lin'kov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: linkovalex@mail.ru.

**Alexei V. Konovalev**, Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: alekseikonov2016@mail.ru.

**Semen A. Kakhaev**, Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vip.kakhaev@mail.ru.

## Применение LSTM-моделей в задачах моделирования и прогнозирования геометрии рельсовой колеи

В.О. Шарова✉

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва, Российская Федерация

✉sharova.valeriia@vniizht.ru

### Резюме

В статье описаны актуальные задачи, связанные с диагностикой и безопасностью движения на железнодорожном транспорте, в особенности на железнодорожном пути. Они касаются ускоренных темпов цифровизации железнодорожного транспорта, а также роста экономики и множественных предпосылок представления дополнительных методов оценки состояния пути для принятия более эффективных управленческих решений. Приведены краткие обзоры различных вариантов моделирования в качестве дополнительных методов для решения поставленных задач. Показаны перспективные методы использования нейронных сетей, рассмотрены классы задач, в которых могут быть задействованы нейронные сети, обозначена проблема их применения, а именно отсутствие методологической базы, стандартизирующей работу с нейронными сетями. Отмечено главное условие для использования нейронных сетей – достоверная обучающая выборка. Для примера применения нейронной сети в задаче моделирования геометрии рельсовой колеи выбрана LSTM-модель, описана архитектура данной модели. Смоделированы фактические вертикальные неровности на выбранном участке железнодорожного пути, рассчитаны среднеквадратичные ошибки моделирования. Подчеркнута целесообразность и высокое качество моделирования с помощью LSTM-модели, а также рост значения среднеквадратичной ошибки с увеличением шагов для прогнозирования, что может быть обусловлено недостатком данных для обучающей выборки. В последующих исследованиях планируется сократить количество ошибок и повысить точность модели, а также попробовать в действии другие нейронные сети различной архитектуры для решения аналогичной задачи с последующим сравнением с LSTM-моделью.

### Ключевые слова

железнодорожный путь, моделирование, нейронные сети, геометрия рельсовой колеи, неровности пути, LSTM-модель

### Для цитирования

Шарова В.О. Применение LSTM-моделей в задачах моделирования и прогнозирования геометрии рельсовой колеи / В.О. Шарова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 89–97. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).89-97.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 15.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 22.04.2024 г.; принята к публикации: 24.04.2024 г.

## Application of LSTM-models in problems of modeling and forecasting the geometry of a rail track

V.O. Sharova✉

Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow, the Russian Federation

✉sharova.valeriia@vniizht.ru

### Abstract

Article describes the current tasks related to the diagnosis and safety of traffic on railway transport and, in particular, on the railway track. These tasks are related to the accelerated pace of digitalization of railway transport, as well as to the growth of the economy and to the multiple prerequisites for the presentation of additional methods for assessing the condition of the track to make more effective management decisions. Brief reviews of various modeling options are given as additional methods for solving the tasks set. Promising methods of using neural networks are shown. Classes of tasks in which neural networks can be used are considered. The problem of using neural networks is outlined, namely, the lack of a methodological framework that standardizes the use of neural networks. The main condition for the use of neural networks is a reliable training sample. As an example of using a neural network in the task of modeling the geometry of a rail track, the LSTM model is selected. The architecture of the LSTM model is described. An example of modeling the actual vertical irregularities on a selected section of railway track is presented, and the quadratic modeling errors are calculated. The expediency and high quality of modeling using the LSTM-model are noted, as well as an increase in the value of the mean square error with increasing steps for forecasting, which may be due to an insufficient number of values for the training sample. The continuation of the research will be to achieve lower error values and increase the accuracy of the model, as well as the use of other neural networks of various architectures to solve the problem of modeling the geometry of the rail track with its subsequent comparison to the LSTM model.

**Keywords**

railway track, modeling, neural networks, track geometry, track irregularities, LSTM-model

**For citation**

Sharova V.O. Primenenie LSTM-modelei v zadachakh modelirovaniya i prognozirovaniya geometrii rel'sovoi kolei [Application of LSTM-models in problems of modeling and forecasting the geometry of a rail track]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 89–97. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).89-97.

**Article info**

Received: April 15, 2024; Revised: April 22, 2024; Accepted: April 24, 2024.

**Введение**

В современных реалиях, на фоне увеличения темпов роста экономики, повышения осевых нагрузок и увеличения грузонапряженности возникают задачи эффективной и безопасной работы железнодорожного транспорта. Естественно, есть множество факторов, вкуче влияющих на решение данных задач, такие как состояние подвижных составов, состояние пути, качество содержания пути и т.д. Остановимся на одном из важнейших параметров этой системы – взаимодействие пути и подвижного состава. Для того чтобы узнать достоверные значения показателей взаимодействия пути и подвижного состава, проводятся натурные испытания. К сожалению, натурные испытания дорогостоящи, а также для решения определенного круга задач необходимо проводить большее количество разного рода натурных испытаний, поэтому, учитывая ускоренную цифровизацию различных сфер железнодорожной области, старые методы решения задач частично заменяются и дополняются новыми подходами и методами. К таким методам относятся различные виды моделирования. Использование моделирования на железнодорожном транспорте уже не является неким новым подходом в решении задач, в частности железнодорожного пути, но количество моделей, их различные внутренние алгоритмы, достоверность и другие параметры совершенствуются по мере развития вычислительной техники и баз знаний о различных изменениях состоянии пути во времени. Одними из значимых моделей являются модели геометрии рельсовой колеи. Они позволяют решать широкий круг задач – накопление остаточных деформаций, определение показателей взаимодействия пути и подвижного состава и др. Таким образом, использование различных математических моделей можно ранжировать на три круга широких задач. Первый – это поиск закономерностей про-

цессов и причин их возникновения: при решении таких задач можно использовать спектральный анализ [1], корреляционный анализ и статистический анализ. Второй – расчет заданных показателей в модели, например, показателей взаимодействия пути и подвижного состава. И третий – это прогнозирование, которое также включает в себя предыдущие пункты.

Данная тема еще является актуальной за счет отсутствия в действующей инструкции по состоянию пути учета периодических неровностей пути, возникающих в геометрии рельсовой колеи, влияющих на показатели пути и подвижного состава, что возвращает нас в первый круг задач, при этом нераздельно влияя на все описанные круги задач.

Целью статьи является иллюстрация применения нейронной сети в задачах прогнозирования и моделирования геометрии рельсовой колеи.

В данной работе будет представлен вариант использования LSTM-модели, а также небольшой обзор других вариантов моделей.

**Обзор моделей**

Главной задачей моделирования является определение выходных заданных параметров различных систем, в качестве исходных данных которых являются характеристики выбранной системы, а также информация о воздействующих на нее внешних факторах. Классическими методами для решения таких задач, используемыми и в настоящее время, являются: математическая статистика, планирование экспериментов, регрессионный анализ, спектральный анализ, методы имитационного и конечно-элементного моделирования. Выбор конкретного метода зависит от поставленной задачи с учетом технологических и физических процессов, протекающих в исследуемом процессе [2]. Примерами классических методов являются авторегрессионные модели и модели векторной

авторегрессии, а также модель авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего. Данные модели рассматривают движение подвижного состава по неровностям пути в виде временного ряда.

Широкое распространение еще в середине прошлого века получили авторегрессионные модели и модели векторной авторегрессии [3, 4]. Они до сих пор широко используются, в частности для моделей геометрии рельсовой колеи. Для построения таких моделей важную роль играют расчеты статистических характеристик, а также ограничения, налагаемые при построении такого рода моделей, а именно проверка на стационарность моделируемого процесса.

Более сложной и комбинированной моделью стала ARIMA-модель (AutoRegressive Integrated Moving Average), также известная как AP-ПСС-модель, модель авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего. Ее особенностью является добавление к регрессионной модели скользящего среднего. Эта модель используется при анализе нестационарных временных рядов. Применение данной модели позволяет улучшить точность в сравнении с регрессионными моделями, а также, как уже упоминалось, применять ее для нестационарных процессов.

При этом при рассмотрении трудноформализуемых и сложных динамических систем использование классических методов может быть обусловлено большим количеством допущений и низкой точностью полученных расчетов. Решение задач, связанных со сложным описанием динамических систем, подверженных изменению большого количества факторов, а также имеющие несколько параллельно работающих технологических линий, сложно формализовать или описать аналитическими зависимостями. Попыткой решения таких сложных задач явилось создание нейронных сетей на основе машинного обучения. Изначально нейронные сети появились благодаря нейрофизиологии и математической логике. Еще в 1943 г. в трудах Мак-Каллока и Питца описывались принципы и построение искусственных нейронных сетей. В дальнейшем исследования показали способность нейронных сетей к обучению и самообучению. Нейронная сеть представляет собой упрощенную модель обработки информации мозгом, в основе работы которой лежат нейроны (модель физического нейрона), состоящие из синапсов, сумматора и функции активации. Характер рас-

пределения нейронов (количество нейронов, слоев и связи между ними) определяют архитектуру нейронной сети. С точки зрения архитектуры распространенными нейронными сетями являются однослойные и многослойные сети прямого распространения и рекуррентные сети. Сформированная структура нейронной сети является основой для ее обучения. Для обучения нейронной сети необходимо использовать выборку сигналов, полученных на основе реальных данных, чтобы обеспечить максимально точный результат. Это является ключевым фактором для обучения нейронной сети [2].

В общем виде классы задач, для которых могут использоваться нейронные сети [5], следующие:

- моделирование трудноформализуемых систем и управление ими;
- распознавание образов и их классификация;
- анализ временных рядов и прогнозирование.

Выше был также представлен вариант классификации задач применительно к железнодорожному пути. Если сопоставить оба варианта классификации, то можно отметить, что использование нейронных сетей в настоящее время также решает все больше задач, поставленных перед железнодорожной отраслью. Рассмотрим каждый класс задач, для решения которых могут быть использованы нейронные сети применительно для железнодорожного пути.

*1. Проблема контроля и технического состояния пути.* Использование нейронной сети для распознавания образов и анализа временных рядов, а также прогнозирования. В качестве входных данных могут быть использованы изображения, полученные с камер подвижного состава. В качестве анализа временных рядов могут быть данные процесса движения подвижного состава по неровностям пути, а также дальнейшее прогнозирование состояния пути. Примеры использования представлены в работах [6–8].

*2. Проблема автоматизированного управления подвижным составом, потребность автоматического контроля различных систем подвижного состава.* Использование систем распознавания образов и машинное зрение также может стать важнейшим помощником в решении данной проблемы. Примеры использования представлены в работах [9–11].

3. *Проблема прогнозирования эксплуатационных показателей.* Актуально прогнозирование грузовых и пассажирских перевозок. Нейронную сеть в данном случае также можно использовать для анализа временных рядов и прогнозирования. Примеры использования представлены в работах [12, 13].

Представленный широкий спектр использования нейронных систем в качестве решений проблем, поставленных перед железнодорожной областью, обусловлен цифровизацией производственных процессов в Российской Федерации, а также трендом в ОАО «РЖД», создающим необходимую технологическую базу для использования нейронных сетей. При всей положительной картине использования нейронных сетей применительно к задачам железнодорожного комплекса отсутствует методологическая база, стандартизирующая использование нейронных сетей. Также отсутствуют стандарты, связанные с верификацией и валидацией математических и имитационных моделей. Поэтому на сегодняшний день использование данных методов моделирования распространено в большинстве своем в научной среде. Возможно с учетом увеличения научных работ на данные темы получится определить нужные стандарты и методологию. В данной статье приведен пример LSTM-модели.

### LSTM-модель

Стремительное развитие искусственных нейронных сетей (ИНС) предоставило для математического моделирования геометрии рельсовой колеи принципиально новые решения. Так, один из видов ИНС – рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Network, RNN), ориентирован на решение задач моделирования направленных последовательностей, таких как естественные языки и временные ряды.

LSTM (LongShort-TermMemory), долгая краткосрочная память – один из видов архитектуры рекуррентной нейронной сети [14], разработанный С. Хохрайтером и Ю. Шмидхубером в 1997 г. [15]. В конструкцию LSTM входят ячейки памяти и механизмы стробирования (выделение некоторого интервала во времени), которые обеспечивают выборочное хранение и извлечение информации в течение длительного времени. Ячейка памяти сохраняет важную информацию с предыдущих временных шагов, позволяя сети распознавать долгосрочные зависимости во входных последовательностях. Механизмы управления, состоящие из элементов ввода, вывода и забывания, регулируют поток информации, поступающей в ячейку памяти и выходящей из нее.

Ячейка LSTM имеет три стробирующих механизма: входной, выходной и блокирующий (рис. 1):

- входной блок определяет, какая информация должна храниться в ячейке;
- функция «забыть» регулирует, какая информация в ячейке сохраняется, а какая забывается;
- выходной элемент определяет, какая информация из ячейки должна быть выведена.

LSTM-модели особенно эффективны в задачах прогнозирующего моделирования, когда входные последовательности связаны с долгосрочными зависимостями и переменной длиной. Это связано с тем, что LSTM-модели могут обрабатывать последовательности переменной длины и хранить информацию в течение дли-

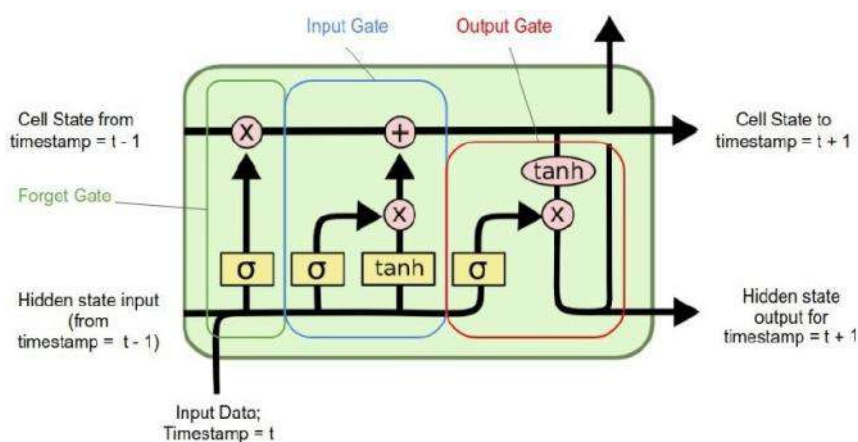


Рис. 1. Ячейка LSTM  
Fig. 1. LSTM cell

тельного времени, что позволяет им распознавать сложные закономерности во входных данных. В решении задач, связанных с временными рядами, LSTM-модели показали себя многообещающими в плане выявления сложных взаимосвязей между переменными и составлением точных прогнозов. Изучая корреляции между входными характеристиками и соответствующими им будущими значениями, сети LSTM могут прогнозировать результаты на основе исторических закономерностей. Это особенно полезно при техническом обслуживании и эксплуатации железных дорог, где такие переменные, как геометрические параметры пути, погодные условия, скорость и вес поезда могут повлиять на будущее состояние пути. LSTM-модели могут эффективно отслеживать эти зависимости и делать точные прогнозы, максимально оптимизируя техническое обслуживание пути и повышая безопасность на железных дорогах [16].

Учитывая многообещающие результаты использования LSTM-модели при решении задач, связанных с временными рядами, именно эта модель была выбрана для моделирования неровностей геометрии рельсовой колеи заданного участка. В ходе проведенных исследований при построении LSTM-моделей в качестве исходных данных рассматривались промеры вертикальных неровностей рельсовой колеи Октябрьской и Горьковской железных дорог. В качестве иллюстрирующего примера был выбран 1 032 км Горьковской железной дороги. Длина промера составила 1 км с шагом 18,5 см. На рис. 2 представлены фактические неровности.

Модель LSTM состоит из нескольких уровней, каждый из которых вносит свой вклад в процесс обучения и прогнозирования. На начальных уровнях входные данные объединя-

ются и анализируются совместно для извлечения соответствующих характеристик и выявления общих закономерностей в данных. Этот первоначальный анализ помогает модели выявить общие тенденции и зависимости, характерные для различных объектов, прежде чем переходить к слоям, относящимся к конкретным объектам. После начальных слоев результаты коллективного анализа распределяются по отдельным слоям, каждый из которых посвящен определенному объекту. Эти слои позволяют модели сосредоточиться на уникальных характеристиках и вариациях каждого объекта, что еще больше повышает способность модели учитывать сложность геометрических параметров пути [16].

Настройка и обучение LSTM-модели выполнялись с использованием модели Sequential библиотеки Keras [17, 18]. Вначале, при разработке LSTM-модели, необходимо выполнить ряд подготовительных операций, в частности необходимо сформировать трехмерный входной вектор, который затем передается во входную форму LSTM. Для формирования трехмерного вектора была написана функция с параметром скользящего окна. Значение этого параметра указывало, сколько первых точек (значений) данных будет учитываться в качестве входных данных  $X_n$  для прогнозирования следующей,  $X_{n+1}$ , точки данных. Затем новое окно со значением  $X_{n+1}$  использовалось в качестве входных данных для прогнозирования  $X_{n+2}$  точки данных и т.д.

При разработке LSTM было определено, что разрабатываемая модель является последовательной, с входным слоем (60, 1), т.е. программа должна использовать 60 точек (значений) данных для предсказания 61-й точки данных. Также к модели добавляется слой LSTM с

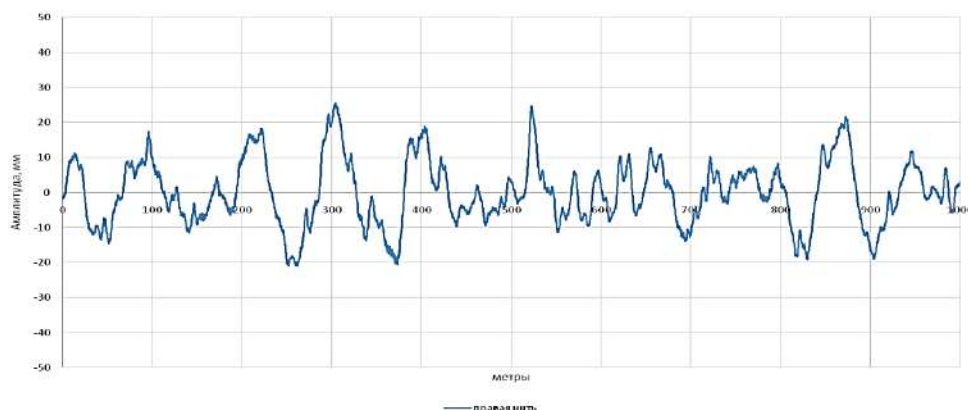


Рис. 2. Фактические неровности 1 032 км (правая нить) Горьковской железной дороги  
Fig. 2. Actual unevenness of 1,032 km (right line) of the Gor'kii railway

64 внутренними узлами, два слоя Dense 8 и 1 слой с узлами, отвечающими за соединения нейронов с функциями активации «relu» и «linear» соответственно. Установка параметров разрабатываемой LSTM-модели представлена на рис. 3.

```

Model: "sequential"
-----
Layer (type)                Output Shape           Param #
-----
lstm (LSTM)                  (None, 64)             16896
dense (Dense)                (None, 8)              520
dense_1 (Dense)              (None, 1)              9
-----
Total params: 17425 (68.07 KB)
Trainable params: 17425 (68.07 KB)
Non-trainable params: 0 (0.00 Byte)

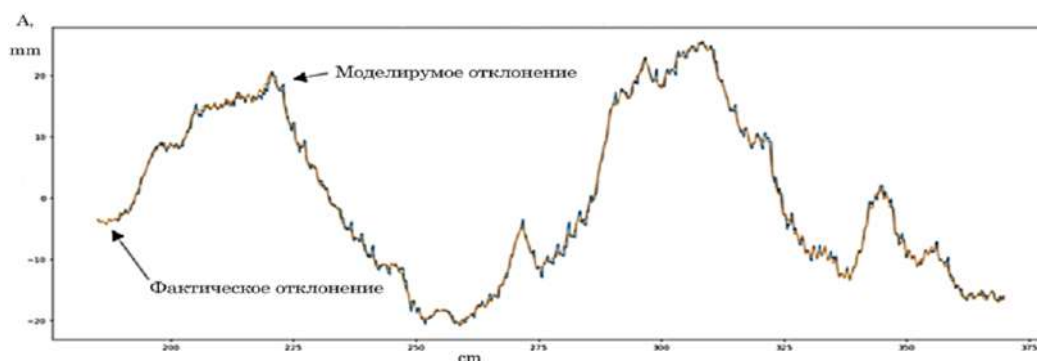
```

**Рис. 3.** Установка параметров LSTM-модели  
**Fig. 3.** Setting LSTM model parameters

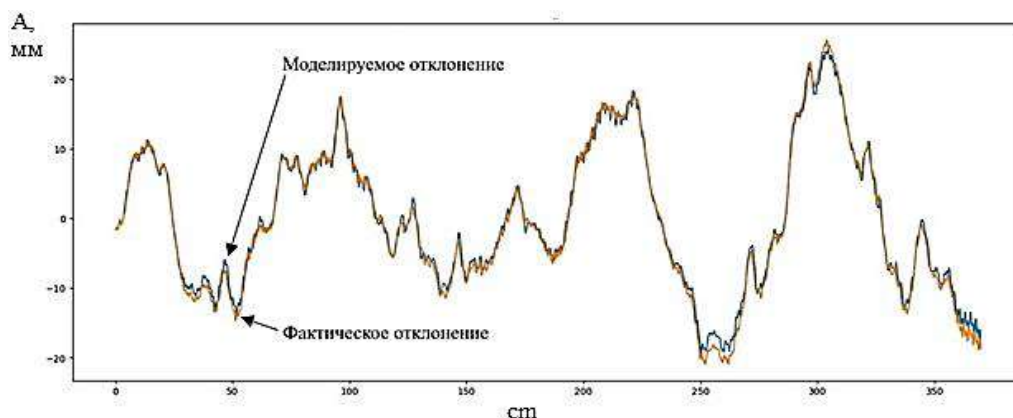
После разработки структуры модели была проведена ее компиляция перед обучением. Потери (loss) при обучении считается среднеквадратичная ошибка, а метрикой (metrics) – среднеквадратичное значение ошибки в корне.

Модель обучалась на 80 встроенных циклах обучения (эпохах). В результате описанных ранее выполненных операций была получена обученная LSTM-модель. Время обучения на каждой эпохе составляло 1–16 мс, потери –  $8,4742e-04$ , метрика – 1,3929.

Оценка качества обученной LSTM-модели выполнялась с помощью тренировочной и тестовой выборки размером 2 000 и 1 000 значений соответственно. После обучения сети она оценивается с использованием тестовых данных. В качестве входных данных для сети во время оценки должны быть предоставлены только данные для текущего временного шага. Затем сеть прогнозирует значения для следующего временного шага. Цель состоит в том, чтобы свести к минимуму среднеквадратическую ошибку между прогнозируемыми значениями и фактическими наблюдениями на следующем временном шаге. Меньшее значение среднеквадратического отклонения указывает на более высокую точность прогноза, что означает более точное соответствие между прогнозируемыми значениями и фактическими наблюдениями.



**Рис. 4.** Фактические и смоделированные значения горизонтальных неровностей правой рельсовой нити  
**Fig. 4.** Actual and simulated values of horizontal unevenness of the right rail thread



**Рис. 5.** Фактические и смоделированные значения вертикальных неровностей правой рельсовой нити  
**Fig. 5.** Actual and simulated values of vertical unevenness of the right rail thread

**Таблица 1.** Среднеквадратичные ошибки прогнозирования LSTM-моделей для значений вертикальных неровностей

**Table 1.** Root Mean Square Prediction Errors of LSTM Models for Vertical Roughness Values

Глубина прогноза Depth of forecast	LSTM-модель LSTM-model	
	Левая нить Left thread	Правая нить Right thread
Прогноз на три шага Three steps forecast	0,936	0,866
Прогноз на пять шагов Five steps forecast	1,255	0,906
Прогноз на десять шагов Ten steps forecast	1,844	1,772

**Таблица 2.** Среднеквадратичные ошибки прогнозирования LSTM-моделей для значений горизонтальных неровностей

**Table 2.** Root Mean Square Prediction Errors of LSTM Models for Horizontal Roughness Values

Глубина прогноза Depth of forecast	LSTM-модель LSTM-model	
	Левая нить Left thread	Левая нить Left thread
Прогноз на три шага Three steps forecast	0,902	0,886
Прогноз на пять шагов Five steps forecast	0,962	0,906
Прогноз на десять шагов Ten steps forecast	1,845	1,772

Результаты фактических и смоделированных значений горизонтальных неровностей правой рельсовой нити для тестовой выборки приведены на рис. 4, а для вертикальных неровностей – на рис. 5.

Для определения качества LSTM-моделей неровностей были вычислены среднеквадратичные ошибки прогнозирования этих моделей для 200 последовательных значений неровностей, представленные в табл. 1 и 2.

Построенные LSTM-модели для 148, 149, 179, 181 км Октябрьской железной дороги, а также 1 024, 1 025, 1 032, 1 033, 1 034 км Горьковской железной дороги продемонстрировали свое высокое качество на всех тестовых выборках и подтвердили возможность и целесообразность их использования при моделировании геометрии рельсовой колеи.

### Заключение

В статье приведены примеры сложных физических процессов, происходящих в железнодорожных системах, требующих интеграции классических подходов с методами машинного обучения. С помощью таких интегральных ме-

тодов можно оптимизировать графики технического обслуживания и обеспечивать безопасную и надежную работу железнодорожной сети, должным образом прогнозируя будущее состояние железнодорожных путей. Точное прогнозирование геометрических параметров пути важно для планирования работ по техническому обслуживанию. Раннее выявление возможных проблем позволяет своевременно проводить техническое обслуживание, избегать дорогостоящего ремонта и сводить к минимуму задержки в движении поездов.

Представленный пример LSTM-модели распознает незначительные изменения в геометрии рельсовой колеи, эффективно фиксирует тенденции и флуктуации в пределах исследуемых сегментов, успешно прогнозируя соответствующие значения профиля. Среднеквадратичные ошибки показывают увеличение значения в соответствии с дальностью прогноза, это может быть обусловлено небольшим набором обучающей выборки. Основываясь на этих результатах, следующим этапом является дальнейшее усовершенствование модели для повышения производительности и достижения



более высоких показателей точности моделирования геометрии рельсовой колеи, а также разработка других моделей с помощью нейронных сетей различных архитектур и алгоритмов для сравнения результатов моделирования и точного определения более эффективных моделей применительно к задачам моделирования геометрии рельсовой колеи.

### Список литературы

1. Спектральный состав неровностей пути и напряженно-деформированное состояние его элементов / А.Я. Коган, М.А. Левинзон, С.В. Малинский и др. // Вестник ВНИИЖТ. 1991. № 1. С. 39–43.
2. Сивицкий Д.А. Анализ опыта перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 2 (57). С. 33–41.
3. Каменский Д.А. Применение моделей векторной авторегрессии при прогнозировании в финансах и экономике // Фундаментальные исследования. 2019. № 5. С. 45–49.
4. Vector Autoregression (VAR) for Multivariate Time Series // geeksforgeeks : site. URL : [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.90520b89-66978ac7-0d872144-74722d776562/](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.90520b89-66978ac7-0d872144-74722d776562/) <https://www.geeksforgeeks.org/vector-autoregression-var-for-multivariate-time-series/> (Accessed March 25, 2024).
5. Хайкин С. Нейронные сети : полный курс. М. : Вильямс, 2006. 1104 с.
6. Пилецкая А.В. Искусственная нейронная сеть и ее применение при диагностике железнодорожных путей // Молодой ученый. 2020. № 20 (310). С. 48–50.
7. Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects / S. Faghih-Roohi, S. Hajizadeh, A. Núñez et al. // International joint conference on neural networks (IJCNN). Vancouver, 2016. P. 2584–2589. DOI: 10.1109/IJCNN.2016.7727522.
8. Денисенко М.А., Исаева А.С., Коц И.Н. Тестирование прототипа системы мониторинга состояния рельсового пути с использованием LSTM рекуррентных нейронных сетей // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. Физико-математ. науки. 2022. Т. 15. № S3.2. С. 51–55.
9. Сорокин Д.В., Кравец А.С. Теоретические предпосылки использования нейронных сетей для решения эксплуатационных задач на железнодорожном транспорте // Транспорт: наука, образование, производство : сб. науч. тр. Ростов н/Д, 2019. Т. 1. С. 214–218.
10. Незевак В.Л. Совершенствование модели влияния параметров графика движения поездов на тяговое электропотребление на участках постоянного и переменного тока с I и II типом профиля пути при помощи регрессионных моделей и нейронных сетей // Вестник транспорта Поволжья. 2017. № 6 (66). С. 34–44.
11. Анализ результатов работы и оценка эффективности гибридной модели идентификации подвижных единиц железнодорожного транспорта / Д.С. Гвоздев, М.Д. Линденбаум, В.В. Храмов и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2013. № 4 (52). С. 47–54.
12. Railway passenger traffic volume prediction based on neural network / W. Zhuo, J. Li-Min, Q. Yong et al. // Applied Artificial Intelligence. 2007. Vol. 21. Iss. 1. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1080/08839510600938409>.
13. Railway freight volume forecasting of neural network based on economic cycles / Y.-H. Guo, Z.-Y. Chen, F.-L. Feng et al. // Tiedao Xuebao. 2010. Vol. 32, Iss. 5. P. 1–6.
14. Рекуррентная нейронная сеть (RNN): виды, обучение, примеры // Neurohive : сайт. URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/rekurrentnye-nejronnye-seti/> (Дата обращения 14.03.2024).
15. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9. Iss. 8. P. 1735–1780. DOI: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
16. Ahmed M. Predicting track geometry using machine-learning methods : master's theses. Newark, 2023. 134 p.
17. ADF тест для анализа временных рядов // Русские Блоги : сайт. URL : <https://russianblogs.com/article/4449640394/> (Дата обращения 30.03.2024).
18. Решение проблем с последовательностью с помощью LSTM в Keras // Rukovodstvo : сайт. URL : [https://rukovodstvo.net/posts/id\\_976/](https://rukovodstvo.net/posts/id_976/) (Дата обращения 05.04.2024).

### References

1. Kogan A.Ya., Levinzon M.A., Malinskii S.V., Pevzner V.O. Spektral'nyi sostav nerovnostej puti i napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie ego elementov [The spectral composition of the path irregularities and the stress-strain state of its elements]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Union Scientific and Research Institute of Railway Transport], 1991, no. 1, pp. 39–43.
2. Sivitskii D.A. Analiz opyta perspektiv primeneniya iskusstvennykh neironnykh setei na zheleznodorozhnom transporte [Analysis of the experience of prospects for the use of artificial neural networks in railway transport]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2021, no. 2 (57), pp. 33–41.
3. Kamenskii D.A. Primenenie modelei vektornoj avtoregressii pri prognozirovanii v finansakh i ekonomike [Application of vector autoregression models in forecasting in finance and economics]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research], 2019, no. 5, pp. 45–49.
4. Vector Autoregression (VAR) for Multivariate Time Series (Electronic Resource). Available at: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.90520b89-66978ac7-0d872144-74722d776562/](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.90520b89-66978ac7-0d872144-74722d776562/) <https://www.geeksforgeeks.org/vector-autoregression-var-for-multivariate-time-series/> (Accessed March 25, 2024)
5. Haikin S. Neironnye seti: polnyi kurs [Neural networks: a comprehensive Foundation]. Moscow: Williams Publ., 2006. 1104 p.

6. Piletskaya A.V. Iskusstvennaya neironnaya set' i ee primeneniye pri diagnostike zheleznodorozhnykh putei [Artificial neural network and its application in railway diagnostics]. *Molodoi uchenyi* [Young scientist], 2020, no. 20 (310), pp. 48–50.
7. Faghieh-Roohi S., Hajizadeh S., Núñez A., Babuska R., De Schutter B. Deep Convolutional Neural Networks for Detection of Rail Surface Defects. *International joint conference on neural networks (IJCNN)*. Vancouver, 2016, pp. 2584–2589. DOI: 10.1109/IJCNN.2016.7727522.
8. Isaeva A.S., Denisenko M.A., Kots I.N. Testirovaniye prototipa sistemy monitoringa sostoyaniya rel'sovogo puti s ispol'zovaniem LSTM rekurrentnykh neironnykh setei [Testing a prototype of a track condition monitoring system using LSTM recurrent neural networks]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki* [Scientific and Technical Bulletin of Saint Petersburg State Polytechnic University. Physical and Mathematical Sciences], 2022, vol. 15, no. 3.2, pp. 51–55.
9. Sorokin D.V., Kravets A.S. Teoreticheskie predposylki ispol'zovaniya neironnykh setei dlya resheniya ekspluatatsionnykh zadach na zheleznodorozhnom transporte [Theoretical prerequisites for the use of neural networks to solve operational problems in railway transportation]. *Sbornik nauchnykh trudov «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings «Transport: science, education, production»]. Rostov on Don, 2019, vol. 1, pp. 214–218.
10. Nezevak V.L. Sovershenstvovaniye modeli vliyaniya parametrov grafika dvizheniya poezdov na tyagovoye elektropotrebleniye na uchastkakh postoyannogo i peremennogo toka c I i II tipom profilya puti pri pomoshchi regressionnykh modelej i neironnykh setei [Improving the model of the influence of train schedule parameters on traction power consumption in sections of constant and alternating current with type I and II of the track profile using regression models and neural networks]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region], 2017, no. 6 (66), pp. 34–44.
11. Gvozdev D.S., Lindenbaum M.D., Khramov V.V., Kovalev S.M. Analiz rezul'tatov raboty i otsenka effektivnosti gibridnoi modeli identifikatsii podvizhnykh edinit zheleznodorozhnogo transporta [Analysis of the results of the work and evaluation of the effectiveness of the hybrid model of identification of mobile units of railway transport]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rosotov State Transport University], 2013, no. 4 (52), pp. 47–54.
12. Zhuo W., Li-Min J., Yong Q., Yan-Hui W. Railway passenger traffic volume prediction based on neural network. *Applied Artificial Intelligence*, 2007, vol. 21, iss. 1, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1080/08839510600938409>.
13. Guo Y.-H., Chen Z.-Y., Feng F.-L., Chang B. Railway freight volume forecasting of neural network based on economic cycles. *Tiedao Xuebao*, 2010, vol. 32, iss. 5, pp. 1–6.
14. Rekurrentnaya neironnaya set' (RNN): vidy, obucheniye, primery (Elektronnyi resurs) [Recurrent Neural Network (RNN): types, training, examples (Electronic Resource)]. Available at: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/rekurrentnye-nejronnye-seti/> (Accessed March 14, 2024).
15. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 1997, vol. 9, iss. 8, pp. 1735–1780. DOI: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
16. Ahmed M. Predicting track geometry using machine-learning methods : master's theses. Newark, 2023. 134 p.
17. ADF test dlya analiza vremennykh ryadov (Elektronnyi resurs) [ADF test for time series analysis (Electronic resource)]. Available at: <https://russianblogs.com/article/4449640394/> (Accessed March 30, 2024)
18. Resheniye problem s posledovatel'nost'yu s pomoshch'yu LSTM v Keras (Elektronnyi resurs) [Solving sequence problems with LSTM in Keras (Electronic resource)]. Available at: [https://rukovodstvo.net/posts/id\\_976/](https://rukovodstvo.net/posts/id_976/) (Accessed April 5, 2024).

### Информация об авторах

**Шарова Валерия Олеговна**, ведущий инженер отдела проблем эксплуатации и предиктивной аналитики путевой инфраструктуры (пути), Научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), г. Москва; e-mail: [sharova.valeriia@vniizht.ru](mailto:sharova.valeriia@vniizht.ru).

### Information about the authors

**Valeriya O. Sharova**, Lead Engineer of the Department of Operational Problems and Predictive Analytics of Track Infrastructure (tracks), Scientific Center «Infrastructure», Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT), Moscow; e-mail: [sharova.valeriia@vniizht.ru](mailto:sharova.valeriia@vniizht.ru).

## Автоматизация процесса устранения неисправностей электровозов в пути следования

Е.А. Третьяков✉, А.П. Шляков, А.Н. Соловьев

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

✉eugentr@mail.ru

### Резюме

Одним из направлений совершенствования электрических подвижных составов является внедрение на них передовых цифровых, аппаратно-программных и интеллектуальных технологий, способных повысить их производительность, эксплуатационную надежность и обеспечить безопасность движения. Современные электровозы должны оснащаться информационно-управляющими бортовыми комплексами, поддерживающими подключение дополнительных управляющих и контрольно-измерительных систем и приборов. К числу таких интеллектуальных инструментов можно отнести системы поддержки принятия решений машинистом, обеспечивающие повышение оперативности действий работников локомотивной бригады в различных ситуациях, в том числе и в нестандартных. В статье представлены результаты исследования возможности автоматизации процесса устранения неисправностей электровозов в пути следования. На основании анализа инструктивных документов, устанавливающих порядок действий локомотивной бригады при возникновении поломки в пути следования и устранении ее последствий, определены основные виды наиболее вероятных повреждений. Разработана классификация методов устранения неисправностей, позволяющая систематизировать отдельные операции в процессе ликвидации неполадок по месту их возникновения, по виду применяемого оборудования, по целевому назначению. В соответствии с разработанной классификацией определена перспектива автоматизации разных операций, выполняемых в настоящее время локомотивной бригадой вручную, и установлено влияние ее на продолжительность восстановления работоспособности электровоза в пути следования. Предложены три уровня автоматизации систем поддержки принятия решений машиниста, для каждого из которых выработаны требования к техническому оснащению электровоза. Полная автоматизация процесса устранения неисправностей в пути следования требует внесения принципиальных изменений в конструкцию и систему управления электрическим, механическим и пневматическим оборудованием локомотива.

### Ключевые слова

электрический подвижной состав, неисправность в пути следования, система поддержки принятия решений, автоматизация операций, информационно-управляющие бортовые комплексы

### Для цитирования

Третьяков Е.А. Автоматизация процесса устранения неисправностей электровозов в пути следования / Е.А. Третьяков, А.П. Шляков, А.Н. Соловьев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 98–110. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).98-110.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 15.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 22.04.2024 г.; принята к публикации: 24.04.2024 г.

## Automation of the troubleshooting process in electric locomotives in route by train

Е.А. Tret'yakov✉, А.Р. Shilyakov, А.Н. Solov'ev

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉eugentr@mail.ru

### Abstract

One of the areas for improving electric rolling stock is the introduction of advanced digital, hardware, software and intelligent technologies that can increase its productivity, operational reliability and ensure traffic safety. Modern electric locomotives must be equipped with on-board information and control systems that support the connection of additional control and instrumentation systems and instruments. Such intelligent systems include driver decision support systems, which ensure increased efficiency of actions of locomotive crew workers in various situations, including emergency ones. The paper presents the results of a study of the possibility of automating the process of troubleshooting electric locomotives along the route. Based on the analysis of instructional documents establishing the procedure for the locomotive crew to act in the event of a malfunction along the route and eliminating its consequences, the main types of possible equipment malfunctions were identified. A classification of troubleshooting methods has been developed, which makes it possible to systematize individual operations in the process of troubleshooting according to the place where they are performed, by the type of equipment used, and by their intended purpose. Based on the de-

veloped classification, the possibility of automating various operations currently performed manually by a locomotive crew has been determined, and its influence on the duration of troubleshooting an electric locomotive along the route has been established. Three levels of automation of driver decision support systems are proposed, with the requirements for the technical equipment of an electric locomotive determined for each. Full automation of the process of troubleshooting along the route requires fundamental changes in the design and control system of the electrical, mechanical and pneumatic equipment of the locomotive.

### Keywords

electric rolling stock, fault along the route, decision making support system, automation of operations, on-board information and control systems

### For citation

Tret'yakov E.A., Shilyakov A.P., Solov'ev A.N. Avtomatizatsiya protsessa ustraneniya neispravnosti elektrovozov v puti sledovaniya [Automation of the troubleshooting process in electric locomotives in route by train]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 98–110. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).98-110.

### Article Info

Received: April 15, 2024; Revised: April 22, 2024; Accepted: April 24, 2024.

### Введение

Современные тенденции совершенствования отечественного электроподвижного состава (ЭПС) во многом определяются задачами, сформулированными в соответствии с приоритетными направлениями научно-технологического развития ОАО «РЖД», в том числе определенными в рамках реализации проекта «Цифровая железная дорога ОАО «РЖД». Данный проект предполагает внедрение таких объектов, как «умная станция», «умный локомотив», «умная инфраструктура», использование технологии «Автоматизация», осуществление широкой автоматизации технологических процессов и применение интеллектуальных систем в различных сферах деятельности железнодорожного комплекса [1].

Одним из решений, реализуемых в рамках данного проекта, является использование малолюдных и безлюдных систем и средств управления, позволяющих минимизировать или исключить участие человека из целого ряда технологических процессов, включая использование технологий промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things, IIoT) и больших данных (Big Data).

Особое внимание в создаваемой структуре современного железнодорожного транспорта отводится внедрению средств автоматизации на тяговом подвижном составе, повышению его эксплуатационной надежности, производительности и энергоэффективности.

Одним из ключевых требований к инновационному электроподвижному составу является применение на нем современных информационно-управляющих бортовых комплексов, позволяющих осуществлять бортовую диагно-

стику тяговых и вспомогательных электрических машин, электрического, механического и пневматического оборудования. Подобные комплексы должны иметь возможность реализации функций автоматизированного прогнозирования наступления предотказного состояния оборудования на основе результатов обработки текущих значений и динамики изменения контролируемых параметров. В случае риска возникновения отказа конкретного узла или системы электровоза информационно-управляющий бортовой комплекс должен формировать тревожные сообщения для работников локомотивной бригады и передавать соответствующую информацию посредством оперативной связи в систему мониторинга состояния локомотива.

Подобный подход должен учитываться уже на стадии проектирования электроподвижного состава, поэтому исследования в области возможности автоматизации процессов, связанных с работой различных его систем, а также обеспечения их работоспособности в процессе эксплуатации имеют большую значимость. В [2–5] рассматриваются подходы к оптимизации ведения поезда, но не учитываются возможности автоматизированного устранения неисправностей электроподвижного состава в пути следования.

Уже сегодня на электровозах постоянного и переменного тока, произведенных в последние десятилетия, применяются микропроцессорные системы управления и диагностики. Хотя подобные системы пока не отвечают в полной мере указанным выше требованиям, но они могут служить основой для выработки ре-

шений, на которых будут реализованы информационно-управляющие бортовые комплексы локомотивов будущего [6].

В качестве одного из направлений развития подобных систем можно рассматривать системы поддержки принятия решений машинистом (СППРМ), которые за счет заложенных в них математических и эвристических моделей помогают сформировать наиболее приемлемые решения по управлению электровозом в различных ситуациях, в том числе в нештатных или аварийных, связанных с нарушением функционирования отдельного оборудования или целых систем электровоза [7–9].

Целью настоящего исследования является оценка возможности автоматизации процесса устранения неисправностей электровозов серии 2ЭС6 в пути на основе системы поддержки принятия решений машиниста.

### Основные виды неисправностей электровозов в пути следования

В процессе эксплуатации ЭПС возникают отказы и неисправности в работе его систем и отдельного оборудования, которые могут приводить к остановкам и задержкам поездов на перегонах и, следовательно, к значительных финансовым издержкам для структурных подразделений ОАО «РЖД».

В настоящее время этой компанией установлена классификация подобных случаев в зависимости от наступивших последствий, предусматривающая три уровня событий:

– первая категория – отказы, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) на 1 ч. и более, либо приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта;

– вторая категория – отказы, приведшие к задержке на перегоне или станции пассажирского или пригородного поезда продолжительностью от 6 мин. до 1 ч., грузового поезда продолжительностью от 15 мин. до 1 ч.;

– третья категория – неисправности – случаи нарушения нормального функционирования технических средств, не имеющие последствий, относящихся к отказам первой и второй категории [10].

Все случаи, подпадающие под указанные категории событий, учитываются и расследуются

в порядке, установленном Положением об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАНТ. При этом рассматривается любая неисправность локомотива или отдельного его узла и оборудования, вызвавшая нарушение его работоспособности и потребовавшая восстановления или замены сборочных единиц и деталей, а также регулировку их характеристик в период между плановыми видами технического обслуживания и ремонта.

Очевидно, что возникновение неисправности или отказа ЭПС в пути следования негативно отражаются на его эксплуатационных показателях, поскольку могут приводить к длительным перебоям в движении поездов и нарушениям исполнения установленного графика движения.

Суммарное дополнительное время нахождения (задержки) поезда на перегоне, вызванное возникновением неисправности электровоза, складывается из следующих составляющих:

$$T_3 = T_T + T_{у.н.} + T_{в.л.} + T_c$$

где  $T_T$  – дополнительное время хода, обусловленное торможением поезда для внеграфиковой остановки поезда из-за возникшей неисправности;  $T_{у.н.}$  – время, затрачиваемое на определение причины неисправности, ее устранение и приведение локомотива в работоспособное состояние;  $T_{в.л.}$  – время, затрачиваемое на вызов вспомогательного локомотива в случае, если неисправность невозможно устранить силами локомотивной бригады;  $T_c$  – дополнительное время хода, обусловленное разгоном и следованием поезда до станции с допустимой (ограниченной) скоростью после устранения неисправности или с помощью вспомогательного локомотива.

Использование на ЭПС систем поддержки принятия решений машиниста может повлиять на продолжительность второй из составляющих дополнительных временных затрат – время  $T_{у.н.}$ . Причем уровень автоматизации СППРМ будет обуславливать степень и характер влияния на эту составляющую.

Для обеспечения оперативного обнаружения и устранения неисправностей оборудования электровозов в пути следования в ОАО «РЖД» разрабатываются и утверждаются нормативные документы, в которых приводится описание основных видов неисправностей, по-

рядок операций по определению их наиболее вероятных причин и устранению последствий. Основной целью подобных инструкций является приведение электровоза в работоспособное состояние и минимизация временных задержек, связанных с нарушениями графика движения поездов.

Анализ информации, содержащейся в рекомендациях по обнаружению и устранению неисправностей в пути следования, помогает определить возможность автоматизации данного процесса. Для примера были рассмотрены подобные рекомендации, разработанные применительно к грузовым электровозам постоянного тока серии 2ЭС6 производства ООО «Уральские локомотивы». Данные рекомендации утверждены распоряжением и устанавливают порядок действий локомотивной бригады в случаях возникновения неисправностей в пути следования [11].

Всего в данном документе устанавливаются методы устранения 69 видов неисправностей электровоза, которые разделены по основным видам оборудования на девять групп:

- высоковольтные цепи;
- повреждение линейных контакторов;
- повреждение силовых диодов;
- цепь питания ПСН-200;
- обрыв цепей управления или не включение аппаратов в них;
- короткое замыкание в цепи питания цепей управления и приводов аппаратов;
- неисправности пневмооборудования;
- неисправности тормозного оборудования;
- неисправности цепей ПСН-210-3 на электровозах № 015 и с № 027.

Анализ рекомендаций показывает, что на электровозах серии 2ЭС6 основными причинами возникающих нештатных ситуаций в пути следования являются следующие процессы:

- короткое замыкание в электрических цепях и оборудовании, возникающее в результате пробоя изоляции, механических повреждений или нарушения нормальной эксплуатации электрических аппаратов, тяговых электродвигателей, преобразователей собственных нужд и вспомогательных машин, аппаратуры управления, пробоя силовых переходных диодов и др.;
- обрывы в электрических цепях вследствие механических повреждений токоведущих частей и приводов тяговых электрических ап-

паратов, заедания элементов контактных соединений коммутационного оборудования;

- нарушения установленных алгоритмов в работе электрического оборудования, вызванные сбоями в программном обеспечении микропроцессорной системы управления и диагностики (МПСУиД) электровоза;

- нарушение нормальных условий эксплуатации электровоза (напряжение в контактной сети выше или ниже установленных значений, недостаточное давление в пневматических магистралях и т.п. [12, 13]);

- нарушение нормальной работы пневматических цепей, пневматического и тормозного оборудования (потеря целостности пневматических магистралей, засорение или замерзание узлов пневматических аппаратов, неисправности тормозных приборов).

Анализ рекомендаций по обнаружению и устранению неисправностей, разработанных для других серий электровозов постоянного и переменного тока, показывает, что перечисленные процессы также могут описать большинство неисправностей, возникающих в пути следования поезда. Различия обусловлены в основном видом применяемого оборудования, его конструкцией и особенностями управления и связаны с особенностями каждой серии электровозов [14–17].

### **Классификация методов устранения неисправностей электровозов**

Для определения возможности автоматизации процесса устранения отдельных неисправностей на электровозе в пути следования был произведен анализ отдельных операций, выполняемых работниками локомотивной бригады, согласно утвержденным рекомендациям.

Была установлена последовательность выполнения операций по выявлению наиболее вероятных причин каждой из неисправностей и ее устранению. При этом учитывались следующие характеристики (признаки) операций:

- место выполнения операции с привязкой к конкретной части (зоне) локомотива (кабина управления, тамбур, кузов (машинное отделение), пространство под кузовом, крыша электровоза и др.);
- вид оборудования или устройства, используемого для выполнения операции (кнопочный выключатель, рукоятка джойстика, тумблер и т.д.);

– назначение операции (основная цель ее выполнения).

Также для каждого вида неисправности были рассмотрены возможные сценарии дальнейшей работы электровоза после их устранения.

В результате проведенного анализа операций по указанным признакам была составлена классификация методов устранения неисправностей и отдельных операций по следующим характеристикам:

#### 1. По месту выполнения операций.

При устранении неисправностей на электровозе четко прослеживается определенная локализация выполнения операций в различных частях (зонах) локомотива. На рис. 1 показаны основные такие зоны применительно к электровозу серии 2ЭС6.

Так, при устранении неисправностей в электрических цепях высоковольтного оборудования (повреждение токоприемников, линейных и реостатных контакторов, нарушение целостности изоляции проводов и токоведущих частей аппаратов, пробой силовых переходных диодов, короткие замыкания в тяговых электродвигателях и др.) большая часть операций (более 2/3 от общего количества) выполняется в кабине управления.

При устранении неисправностей в цепях питания преобразователей собственных нужд (ПСН) часть операций выполняется в машинном отделении, а другая часть – в кабине управления.

В случае устранения последствий короткого замыкания или обрыва в цепях управления,

а также при несрабатывании силового электрооборудования по другим причинам, большинство операций по устранению неисправностей выполняется в машинном отделении.

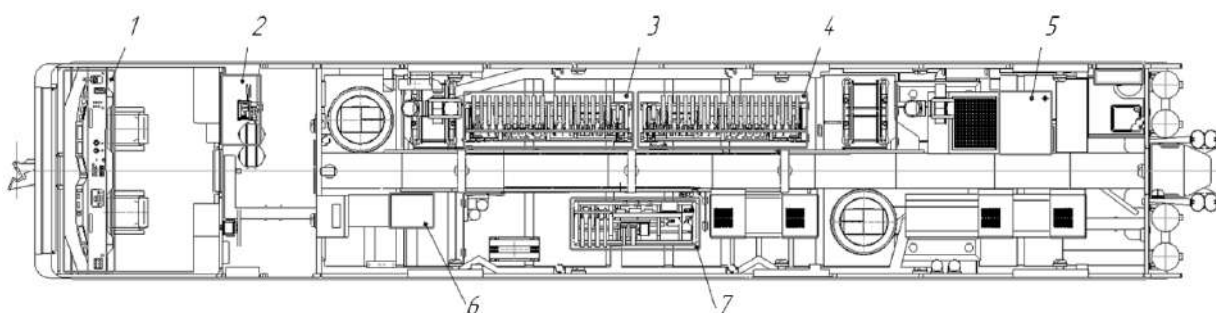
При устранении неисправностей пневматического оборудования наряду с операциями в кабине управления и машинном отделении предполагаются переключения положений кранов на пневматических магистралях под кузовом электровоза и в местах межсекционных соединений. В ряде случаев предусматривается перенос управления из неисправной секции и приведение ее в «холодное» состояние.

Операции по устранению неисправностей тормозного оборудования электровоза серии 2ЭС6 выполняются в основном с унифицированным комплексом тормозного оборудования (УКТОЛ) в кабине управления, где на панелях пульта установлены органы управления этим комплексом, или в тамбуре, где в отдельном шкафу размещается его исполнительная часть.

Кроме перечисленных мест, в которых производится выполнение операций по устранению неисправностей оборудования в пути следования, в случае излома токоприемника производится увязка его элементов, что предполагает выполнение определенных операций на крыше электровоза.

#### 2. По виду используемого оборудования.

Основная часть операций, выполняемых в кабине управления, связана с переключениями силового электрооборудования, проверкой срабатывания защиты и отключением участков электрических и пневматических цепей, содер-



**Рис. 1.** Основные зоны на электровозе серии 2ЭС6, в которых выполняются операции по устранению неисправностей:

- 1 – пульт управления; 2 – шкаф унифицированного комплекса тормозного пневматического и электропневматического оборудования локомотивов; 3 – блок аппаратов № 1; 4 – блок аппаратов № 2; 5 – компрессорная установка; 6 – шкаф микропроцессорной системы управления и диагностики; 7 – блок аппаратов № 3

**Fig. 1.** The main areas on the 2ES6 series electric locomotive in which troubleshooting operations are performed: 1 – control panel; 2 – cabinet of the unified complex of pneumatic and electropneumatic brake equipment of locomotives;

жащих неисправное оборудование. При этом операции должны производиться непосредственно машинистом электровоза посредством органов управления, размещенных на панелях пульта управления ПУ-Эл электровоза.

Операции, выполняемые в машинном отделении (кузове) локомотива, как правило заключаются в переключении выключателей в шкафу МПСУиД, осмотре силовых аппаратов в соответствующих блоках на наличие следов повреждений, перекрытии пневматических магистралей, питающих электрические аппараты сжатым воздухом.

При возникновении неисправностей, связанных с работой ПСН, операции, выполняемые в машинном отделении, заключаются в поиске неисправного блока ПСН путем пере-

ключения ножевых контактов соответствующих переключателей из одного положения в другое. При этом в кабине управления производят восстановление защиты с целью установления места короткого замыкания, выключение цепей с неисправными блоками ПСН, перевод тяговых электродвигателей в режим последовательного возбуждения и т.д.

При устранении неисправностей в цепях управления оборудованием производят переключение их питания от аккумуляторных батарей, выполняют ручной перевод контактных систем силовых аппаратов из одного положения в другое, отключают питание сжатым воздухом неисправных устройств, проверяют состояние автоматических выключателей в шкафу МПСУиД и др. В кабине управления при

	Управление оборудованием	Контроль за работой оборудования	Устранения простых неисправностей
В кабине управления	<ul style="list-style-type: none"> <li>– переключение органов управления на пульте управления;</li> <li>– запуск / перезапуск систем электровоза;</li> <li>– переключение приборов управления тормозами</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>контроль информации на пульте управления по мониторам МПСУиД, стрелочным приборам, световым индикаторам</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>замена элементов системы управления оборудованием (с исправной секции)</li> </ul>
В машинном отделении	<ul style="list-style-type: none"> <li>– переключение тумблеров в шкафу МПСУиД;</li> <li>– перевод ножей разъединителей и отключателей оборудования;</li> <li>– принудительное переключение контактных систем аппаратов;</li> <li>– переключение органов управления компрессорной установкой;</li> <li>– перекрытие кранов в пневматических цепях</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– проверка срабатывания защиты;</li> <li>– осмотр состояния оборудования;</li> <li>– проверка порядка включения аппаратов;</li> <li>– контроль контактных систем;</li> <li>– проверка подключения разъемов;</li> <li>– контроль замыкания защитных блокировок;</li> <li>– контроль давления сжатого воздуха в пневматических цепях;</li> <li>– проверка работы компрессора</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– наложение изоляции на провода;</li> <li>– обогрев пневматических приборов и трубопроводов;</li> <li>– механическое удаление наледи и засоров в пневматических цепях;</li> <li>– регулировка узлов оборудования</li> </ul>
Снаружи локомотива	<ul style="list-style-type: none"> <li>– перекрытие кранов в пневматических магистралях;</li> <li>– продувка или выпуск сжатого воздуха из пневматических магистралей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– контроль поднятия токоприемника;</li> <li>– проверка целостности воздухопроводов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– увязка элементов конструкции токоприемника;</li> <li>– замена межсекционных рукавов пневматических магистралей</li> </ul>

Рис. 2. Основные виды операций при устранении неисправностей электровоза серии 2ЭС6 в пути следования

Fig. 2. The main types of operations when troubleshooting an electric locomotive of the 2ES6 series along the route



подобных неисправностях обычно выполняются операции, связанные с контролем состояния оборудования электровоза (наличие и уровень напряжения в бортовой сети, величина давления в магистрали цепей управления, сигнализация о текущем положении контактов аппаратов), производится запуск (перезапуск) систем (МСУЛ, ПСН), а также переключение органов управления на пульте ПУ-Эл.

При восстановлении работоспособного состояния пневматического оборудования в кабине управления производят контроль уровня давления сжатого воздуха в пневматических сетях и выполняют отключение оборудования с неисправной пневматической частью. В машинном отделении осуществляется контроль за работой компрессорной установки, перекрытие воздухопроводов внутри кузова и т.д.

### 3. По назначению выполняемых операций.

Отдельные операции по устранению неисправностей различаются между собой по назначению и выполняемым действиям. Причем обе эти характеристики каждой операции взаимосвязаны и зависят от места ее выполнения на электровозе.

Анализ методов устранения неисправностей позволяет разделить операции на несколько групп по их назначению (рис. 2).

1. Операции, выполняемые с целью управления оборудованием локомотива.

*В кабине управления:* переключение органов управления на панелях пульта ПУ-Эл (переключателей, тумблеров, рукояток джойстиков); запуск или перезапуск отдельных систем электровоза (МСУЛ, ПСН); переключение приборов управления тормозами локомотива и поезда (контроллера крана машиниста (ККМ) и крана вспомогательного тормоза с дистанционным управлением (КВТ)).

*В машинном отделении:* переключение тумблеров переключателей в шкафу МПСУиД; перевод ножей разъединителей и отключателей оборудования; принудительное переключение контактных систем высоковольтных аппаратов (посредством изоляционных рукояток, воздействия на электропневматические вентили); переключение органов управления компрессорной установкой (блок управления); перекрытие кранов в пневматических цепях (цепи управления электрооборудованием, цепи тормозного оборудования).

*Снаружи локомотива:* перекрытие кранов в пневматических магистралях; продувка или выпуск сжатого воздуха из пневматических магистралей.

2. Операции, выполняемые с целью контроля за работой оборудования локомотива.

*В кабине управления:* контроль информации на пульте управления по мониторам МПСУиД, стрелочным приборам, световым индикаторам.

*В машинном отделении:* проверка срабатывания защитных аппаратов; осмотр состояния силового оборудования в блоках аппаратов; контроль порядка включения оборудования (секвенции); контроль положения контактных систем электрических аппаратов; проверка подключения проводов к разъемам блоков с оборудованием; проверка замыкания защитных блокировок (крышовой люк, высоковольтная камера, жалюзи); контроль давления сжатого воздуха в пневматических цепях (магистраль компрессора, цепи управления); проверка направления вращения компрессора; осмотр узлов компрессора на предмет поиска следов нагара; контроль температуры масла в системе охлаждения компрессора; проверка уровня масла в компрессоре; проверка цвета масла компрессора.

*Снаружи локомотива:* контроль поднятия токоприемника; проверка целостности воздухопроводов.

3. Операции, выполняемые с целью устранения отдельных простых неисправностей оборудования локомотива.

*В кабине управления:* замена элементов системы управления оборудованием (с исправной секции).

*В машинном отделении и тамбуре:* перевод электрических аппаратов с дистанционного на ручное управление; наложение изоляции на провода; обогрев пневматических приборов и трубопроводов; механическое удаление наледи и засоров в пневматических цепях; регулировка узлов оборудования (например, закручивание или выкручивание регулировочных винтов в тормозных аппаратах).

*Снаружи локомотива:* увязка элементов конструкции токоприемника; замена межсекционных рукавов пневматических магистралей.

С учетом основных разновидностей выполняемых операций затрачиваемое на устранение неисправностей время может быть найдено из выражения:

$$T_{y.n} = \sum_1^{n_1} t_{y.p.i} + \sum_1^{n_2} t_{k.i} + \sum_1^{n_3} t_{п.i} + \sum_1^{n_4} t_{y.п.н.i}, \quad (1)$$

где  $\sum_1^{n_1} t_{y.p.i}$  – суммарное время операций по управлению оборудованием локомотива;  $\sum_1^{n_2} t_{k.i}$  – суммарное время операций по контролю за работой оборудования;  $\sum_1^{n_3} t_{п.i}$  – суммарное время, затрачиваемое на перемещение из одной зоны локомотива в другую в процессе устранения неисправности;  $\sum_1^{n_4} t_{y.п.н.i}$  – время на устранение отдельных простых неисправностей;  $i$  – номер операции;  $n_1, n_2, n_3, n_4$  – число операций соответствующего вида.

Очевидно, что автоматизация СППРМ может повлиять на время, необходимое для устранения неисправности электровоза. При этом степень такого влияния будет зависеть от возможностей автоматизации конкретных операций.

### **Возможность автоматизации операций по устранению неисправностей электровоза**

Различные виды операций по устранению неисправностей электровоза будут характеризоваться разной сложностью их автоматизации. Здесь значимую роль играет способ выполнения данной операции (выполняется она человеком непосредственно или дистанционно) и степень участия человека (требуется ли непосредственное его участие в выполнении операции или ее можно реализовать при помощи технических устройств).

На основании проведенного анализа все операции можно разделить на три группы:

1. Операции, которые могут быть автоматизированы без внесения кардинальных изменений в структуру системы управления.

Легче всего автоматизировать операции, связанные с контролем состояния или параметров работы оборудования электровоза. Так, информация, получаемая локомотивной бригадой в кабине управления по мониторам МПСУиД, измерительным приборам и световым индикаторам, уже может быть использована для автоматизации процессов по-

иска вероятных причин неисправностей и определения путей их устранения.

Большую часть операций по контролю состояния или параметров оборудования, выполняемых в машинном отделении или тамбуре (шкаф УКТОЛ), также можно автоматизировать без внесения значительных изменений в структуру системы управления. В этом случае электрические и пневматические цепи, оборудование в шкафах и блоках, подлежащие контролю, необходимо дополнительно оснастить соответствующими типами датчиков (тока, напряжения, давления, температуры, положения) и средствами контроля сопротивления изоляции. Возможно также применение элементов системы технического зрения.

Такое решение позволяет исключить в большинстве случаев необходимость работникам локомотивной бригады покидать кабину управления и обеспечивает их информацией о техническом состоянии оборудования электровоза непосредственно на рабочем месте. За счет этого можно сократить время поиска причины возникновения неисправности и ее устранения.

Кроме этого, применение средств объективного контроля для выявления причин неисправностей позволит перейти от субъективной оценки отказа к объективной информации о техническом состоянии оборудования. Это ускоряет процесс определения причин неисправности и виновников ее возникновения и упрощает порядок расследования в случае, если неисправность приведет к транспортному происшествию.

Особую эффективность такой подход может иметь при поиске мест возникновения короткого замыкания в силовых цепях ЭПС, часто сопровождающего образованием вспышек, искр, появлением дыма. Локомотивная бригада не может фиксировать эти явления в момент их возникновения, поскольку находится в кабине управления, и вынуждена позднее выявлять аварийное оборудование либо по оставленным электрической дугой следам, либо путем последовательных проверок, отбрасывая несостоятельные варианты. Обнаружение, фиксация и распознавание различного рода явлений, сопровождающих аварийные процессы, позволит значительно ускорить процесс устранения неисправностей.

Автоматизация операций контроля состояния оборудования снаружи локомотива также

может быть решена за счет установки соответствующих датчиков и видеокамер на крыше и в подкузовном пространстве с передачей данных в СППРМ. В результате исключаются затраты времени на операции, связанные с выходом работников локомотивной бригады на пути, что повышает уровень безопасности их работы. Кроме того, это улучшит условия работы машиниста и его помощника (в особенности в ночное или в зимнее время года, в условиях плохой погоды).

2. Операции, для автоматизации которых потребуется изменение принципов работы системы управления электровозом.

Сложнее всего обстоит дело с автоматизацией операций, связанных с управлением отдельным оборудованием или целыми системами электровоза. В общем случае автоматизация большей части таких операций возможна, но требует значительных изменений в системе управления локомотива.

Во-первых, необходимо оснастить все переключающие устройства в электрических и пневматических цепях дистанционным приводом с возможностью управления от МПСУиД. Это потребует замены значительной части устройств управления, что возможно выполнить только при разработке нового электроподвижного состава или глубокой модернизации существующего.

Во-вторых, потребуется пересмотреть подходы к управлению локомотивом и изменить принципы, на которых сегодня создаются и функционируют органы управления оборудованием и режимами его работы. В настоящее время для управления многими аппаратами электровоза (например, токоприемниками, быстродействующими выключателями и др.) применяются двух- или многопозиционные переключатели с фиксированными рабочими положениями, которые должны соответствовать ряду требований, устанавливаемым государственными стандартами [18–20]. В принцип работы электрических цепей управления на современных электровозах также изначально заложено применение именно таких переключателей.

Для автоматизации операций управления таким оборудованием возникает вероятность несоответствия положения органа управления (например, тумблера или поворотного переключателя) реальному рабочему состоянию аппарата. Таким образом, потребуется замена

подобных задающих устройств на переключатели без фиксации переключенного состояния (кнопочные выключатели без фиксации, сенсорные панели и т.п.).

Аналогичным образом требуется решить вопрос с дистанционным восстановлением включенного состояния некоторых защитных аппаратов, например, автоматических защитных выключателей.

В-третьих, потребуется изменение конфигурации цепей управления оборудованием для возможности их переключения как машинистом, так и системой поддержки принятия решений через МПСУиД электровоза. Потребуется прокладка большого числа каналов управления к приводам аппаратов, которые до этого переключались исключительно вручную (значительная часть разъединителей и отключателей оборудования, разобщительные или концевые краны на пневматических магистралях и т.д.).

Такая глубокая переработка системы управления у существующих в настоящее время серий локомотивов потребует значительных затрат и вряд ли может быть признана рациональной, поэтому полную автоматизацию операций управления оборудованием целесообразно внедрять только на вновь разрабатываемых электровозах. Здесь можно на этапе проектирования системы управления заложить такие принципы ее функционирования и структуру, которые обеспечили бы при необходимости автоматическое выполнение всех операций, связанных с управлением электровозом.

Автоматизацию операций, связанных с устранением отдельных простых неисправностей оборудования, возможно выполнить лишь частично. Среди этих операций есть такие, из процесса выполнения которых можно исключить человека. Например, можно предусмотреть подогрев трубопроводов и аппаратов в пневматических цепях, подверженных замерзанию и образованию наледи в зимнее время года. Также можно исключить операции, связанные с заменой неисправного оборудования на головной секции на исправное, снимаемое с прицепной секции, путем резервирования узлов в соответствующих системах электровоза.

3. Операции, которые нельзя полностью автоматизировать. К ним относятся операции, связанные с устранением простых неисправностей. Так, невозможно автоматизировать опе-

рации по зачистке и изолированию проводов, регулировке оборудования, замене рукавов пневматических магистралей, устранения нарушения габарита подвижного состава и др. В этих случаях в выполнении операций должны участвовать работники локомотивной бригады.

### Уровни автоматизации процесса устранения неисправностей электровозов в пути следования

Проведенный анализ характеристик отдельных операций, выполняемых в процессе устранения неисправности электровоза в пути следования, позволяет определить степень возможной автоматизации систем поддержки принятия решений машиниста.

*Первый уровень* – неавтоматизированные СППРМ. Такие системы по запросу машиниста выдают в виде текстовых сообщений информацию с рекомендациями по устранению неисправности. При этом СППРМ способна фиксировать только те рабочие параметры оборудования, которые измеряются штатными устройствами электровоза. Все операции по управлению оборудованием локомотива в процессе устранения неисправностей выполняются вручную работниками локомотивной бригады.

Время, затрачиваемое на поиск причин неисправности и ее устранения ее последствий, определяется его составляющими по выражению (1) и зависит от вида вышедшего из строя оборудования и тяжести последствий аварийной ситуации.

*Второй уровень* – автоматизированные СППРМ. Эти системы позволяют реализовать без участия человека операции по устранению неисправностей, которые можно автоматизировать за счет постановки дополнительного оборудования без внесения значительных изменений в существующую структуру системы управления электровоза. К ним относятся операции контроля параметров и состояния оборудования электровоза, а также частично операции, обеспечивающие управление оборудованием и устранение отдельных простых неисправностей.

На электровозе, оснащенный такой системой, автоматически происходит фиксация неисправности, вычисление ее наиболее вероятной причины, выдается в наиболее удобной форме (текст, изображение, анимация) информация по выполнению операций, которые про-

изводятся вручную работниками локомотивной бригады. Такая СППРМ может выполнять часть операций, связанных с управлением оборудованием локомотива (например, произвести переключения контакторов в блоках аппаратов с целью проверки правильной очередности их срабатывания, произвести набор позиций и т.д.). При этом машинист всегда может вмешаться в работу этой системы и перевести процесс управления в ручной режим.

За счет использования возможностей автоматизированной СППРМ можно существенно сократить время, затрачиваемое на операции

управления  $\sum_1^{n_1} t_{упр.}$  и контроля  $\sum_1^{n_2} t_{к.}$ , а также

свести к минимуму перемещения из одной зоны электровоза в другую в процессе устранения

неисправности (время  $\sum_1^{n_3} t_{п.}$ ).

Использование подобных систем представляется наиболее рациональным решением для уже существующих серий ЭПС, в том числе грузовых электровозов серии 2ЭС6.

*Третий уровень* – автоматические СППРМ. Подобные системы предполагают полную автоматизацию операций по контролю параметров и управлению оборудованием электровоза, резервирование узлов в различных системах (блоках) электровоза. В случае возникновения какой-либо неисправности на электровозе система сама ее фиксирует и определяет причину, производит выбор операций по устранению и приведению локомотива в работоспособное состояние, реализует эти операции, представляет результаты машинисту по установленному протоколу и обеспечивает автоматическую передачу информации о происшествии в комплексную автоматизированную систему учета, контроля устранения отказов технических средств ОАО «РЖД» и анализа их надежности (КАСАНТ).

### Заключение

Одной из основных задач любой системы поддержки принятия решений машиниста является исключение отказов локомотивов в пути следования, а в случае возникновения неисправностей их оперативное устранение. При этом система в зависимости от степени ее автоматизации может выступать в качестве «со-

ветчика» для машиниста, подсказывая ему порядок выполняемых операций для устранения неисправности, а может и взять на себя выполнение определенного набора операций, связанных с приведением локомотива в работоспособное состояние.

Полная автоматизация процесса устранения неисправностей электровоза в пути следования позволит максимально сократить время выполнения операций, связанных с управлением оборудованием и контролем за его состоянием, и практически исключить необходимость переме-

щения работников локомотивной бригады по электровозу в процессе приведения его в работоспособное состояние.

При использовании СППРМ третьего уровня машинисту в подавляющем большинстве случаев отводится роль наблюдателя, имеющего возможность перевести в случае необходимости процесс на ручное управление. Такие системы могут быть использованы и при дистанционном или полностью автоматическом управлении ЭПС, в том числе с применением технологии «Автомашинист».

### Список литературы

1. Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : распоряжение ОАО «РЖД» № 769/р от 17.04.2018 г. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
2. Semmens P. High Speed in Japan: Shinkansen the World's Busiest High Speed Railway. Sheffield : Platform 5 Publ., 1997. 108 p.
3. Töpfer C. Optimierung Kompetenz des Zugs anhand Bordscomputers // Eisenbahningenieur. 1998. Iss. 2. S. 68–70.
4. Horstmann D., Wagner R., Weigel W.-D. 100 Jahre Entwicklung der Antriebsstechnik für elektrische Bahnen. Teil 2 // Elektrische Bahnen. 2003. Iss. 7. P. 338–345.
5. Скалозуб В.В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкцій рухомого складу : дис. ... д-ра техн. наук. Днепропетровск, 2003. 533 с.
6. Повышение надежности и перспективы развития микропроцессорных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов / В.М. Абрамов, Л.А. Мугинштейн, Б.Д. Никифоров и др. // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 5. С. 9–14.
7. Кузнецов М.А., Пономарев С.С. Современная классификация систем поддержки принятия решений // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2009. № 3 (7). С. 52–58.
8. Моргунов Е.П. Система поддержки принятия решений при исследовании эффективности сложных систем: принципы разработки, требования и архитектура // Вестн. Сибир. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2007. № 3 (16). С. 59–63.
9. Соловьев А.Н., Третьяков Е.А. К вопросу о совершенствовании эксплуатации электроподвижного состава на основе системы поддержки принятия решений машиниста // Молодежь и системная модернизация страны : сб. науч. ст. VII Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых. Курск, 2022. Т. 5. С. 93–97.
10. Об утверждении документов ОАО «РЖД» по вопросам учета отказов в работе технических средств и технологических нарушений на инфраструктуре ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» № 1915/р от 06.09.2021 (ред. 07.11.2023). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
11. Об утверждении перечня действий локомотивных бригад по выявлению и устранению неисправностей на локомотивах при поездной и маневровой работе : распоряжение ОАО «РЖД» № 996/р от 12.04.2022 (ред. 05.03.2024). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
12. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России № 250 от 23.06.2022. Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
13. ГОСТ 9219-88 Аппараты электрические тяговые. Общие технические требования. Введ. 1990–01–01. М. : Изд-во стандартов, 1988. 36 с.
14. Электровоз 2ЭС4К. Руководство по эксплуатации. Кн. 7. Использование по назначению. Новочеркасск : Новочеркасский электровозостроительный завод, 2006. 79 с.
15. Электровоз ЭП2К. Руководство по эксплуатации. Кн. 2. Инструкция по эксплуатации. Коломна : Коломенский завод, 2004. 172 с.
16. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Кн. 7. Использование по назначению. Новочеркасск : Новочеркасский электровозостроительный завод, 2005. 167 с.
17. Электровоз ЭП1. Руководство по эксплуатации. Кн. 2. Описание и работа. Компонировка оборудования. Монтаж электрический. Система вентиляции. Новочеркасск : Новочеркасский электровозостроительный завод, 2006. 576 с.
18. ГОСТ 12.2.056-81 ССБТ. Электровозы и тепловозы колеи 1520 мм. Требования безопасности (ред. 10.03.2016). Введ. 1983–01–01. М. : Изд-во стандартов, 1981. 38 с.
19. ГОСТ 22613-77 Система «Человек – машина». Выключатели и переключатели поворотные. Общие эргономические требования. Введ. 1978–07–01. М. : Изд-во стандартов, 1988. 6 с.
20. ГОСТ 22615-77 Система «Человек – машина». Выключатели и переключатели типа «Тумблер». Общие эргономические требования. Введ. 1978–07–01. М. : Изд-во стандартов, 1977. 5 с.

## References

1. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 769/r ot 17.04.2018 g «Ob utverzhdenii strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 g. i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga)» [Order of JSC Russian Railways No 769/r dated April 17, 2018 «On approval of the strategy of scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book)»].
2. Semmens P. High Speed in Japan: Shinkansen the World's Busiest High Speed Railway. Sheffield: Platform 5 Publ., 1997. 108 p.
3. Töpfer C. Optimierung Kompetenz des Zugs anhand Bordscomputers. *Eisenbahningenieur*, 1998, iss. 2, pp. 68–70.
4. Horstmann D., Wagner R., Weigel W.-D. 100 Jahre Entwicklung der Antriebs-technik für elektrische Bahnen. Teil 2. *Elektrische Bahnen*, 2003, iss. 7, pp. 338–345.
5. Skalozub V.V. Resursosberegayushchie metody upravleniya tyagoi poezdov i sovershenstvovanie konstruktivnykh podvizhnogo sostava [Resource-saving methods of train traction control and improving the design of rolling stock]. Doctor's theses. Dnepropetrovsk, 2003. 533 p.
6. Abramov V.M., Muginshtein L.A., Nikiforov B.D., Rabinovich M.D. Povyshenie nadezhnosti i perspektivy razvitiya mikroprotsessornykh sistem upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov [Improving reliability and prospects for the development of microprocessor control systems and ensuring the safety of train traffic]. *Vestnik VNIIZHT* [Bulletin of the Scientific and Research Institute of Railway Transport], 2002, no. 5, pp. 9–14.
7. Kuznetsov M.A., Ponomarev S.S. Sovremennaya klassifikatsiya sistem podderzhki prinyatiya reshenii [Modern classification of decision support systems]. *Prikaspiyskii zhurnal: upravleniye i vysokie tekhnologii* [Caspian journal: Control and High Technologies], 2009, no. 3 (7), pp. 52–58.
8. Morgunov E.P. Sistema podderzhki prinyatiya reshenii pri issledovanii effektivnosti slozhnykh sistem: printsipy razrabotki, trebovaniya i arkhitektura [Decision support system for studying the effectiveness of complex systems: design principles, requirements and architecture]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev], 2007, no. 3 (16), pp. 59–63.
9. Solov'ev A.N., Tretyakov E.A. K voprosu o sovershenstvovanii ekspluatatsii elektropodvizhnogo sostava na osnove sistema podderzhki prinyatiya reshenii mashinista [On the issue of improving the operation of electric rolling stock based on the driver's decision support system]. *Sbornik nauchnykh statei VII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh «Molodezh' i sistemnaya modernizatsiya strany»* [Proceedings of the VII International Scientific Conference of Students and Young Scientists «Youth and systemic modernization of the country»]. Kursk, 2022, vol. 5, pp. 93–97.
10. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 1915/r ot 06.09.2021 «Ob utverzhdenii dokumentov OAO «RZhD» po voprosam ucheta otkazov v rabote tekhnicheskikh sredstv i tekhnologicheskikh narushenii na infrastrukture OAO «RZhD» (red. 07.11.2023) [Order of JSC «Russian Railways» No 1915/r dated September 6, 2021 «On approval of documents of JSC «Russian Railways» on accounting for failures in the operation of technical means and technological violations on the infrastructure of JSC «Russian Railways» (ed. November 7, 2023)].
11. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 996/r ot 12.04.2022 «Ob utverzhdenii perechnya deistvii lokomotivnykh brigad po vyyavleniyu i ustraneniyu neispravnostei na lokomotivakh pri poezdnoi i manevrovoi rabote» (red. 05.03.2024) [Order of JSC «Russian Railways» No 996/r dated April 12, 2022 «On approval of the list of actions of locomotive crews to identify and eliminate malfunctions on locomotives during train and shunting work» (ed. March 5, 2024)].
12. Prikaz Mintransa Rossii № 250 ot 23.06.2022 «Ob utverzhdenii 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»].
13. GOST 9219-88. Apparaty elektricheskoye tyagovoye. Obshchie tekhnicheskoye trebovaniya [State Standard 9219-88. Tractive electrical apparatus. General technical requirements]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1988. 36 p.
14. Elektrovoz 2ES4K. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kn. 7. Ispol'zovanie po naznacheniyu [Electric locomotive 2ES4K. User manual. Book 7. Intended use]. Novocherkassk: Novocherkasskii elektrovozostroitel'nyi zavod Publ., 2006. 79 p.
15. Elektrovoz EP2K. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kn. 2. Instruksiya po ekspluatatsii [The EP2C electric locomotive. User manual. Book 2. Operating instructions]. Kolonna: Kolomenskii zavod Publ., 2004. 172 p.
16. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kn. 7. Ispol'zovanie po naznacheniyu [Main-line electric locomotive 2ES5K (3ES5K). User manual. Book 7. Intended use]. Novocherkassk: Novocherkasskii elektrovozostroitel'nyi zavod, 2005. 167 p.
17. Elektrovoz EP1. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kn. 2. Opisanie i rabota. Komponovka oborudovaniya. Montazh elektricheskoye. Sistema ventilyatsii [Electric locomotive EP1M. User manual. Book 2. Description and work. The layout of the equipment. The installation is electric. Ventilation system]. Novocherkassk: Novocherkasskii elektrovozostroitel'nyi zavod Publ., 2006. 576 p.
18. GOST 12.2.056-81 SSBT. Elektrovozy i teplovozy kolei 1520 mm. Trebovaniya bezopasnosti (red. 10.03.2016) [State Standard 12.2.056-81 The system of occupational safety standards. Occupational safety standards system. Electric and diesel locomotives for 1520 mm gauge. Safety requirements (ed. March 10, 2016)]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1981. 38 p.
19. GOST 22613-77 Sistema «Chelovek–mashina». Vyklyuchateli i pereklyuchateli povorotnye. Obshchie ergonomicheskoye trebovaniya [State Standard 22613-77. «Man–machine» system. Rotary switches and commutators. General ergonomic requirements]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1988. 6 p.

20. GOST 22615-77 Sistema «Chelovek–mashina». Vyklyuchateli i pereklyuchateli tipa «Tumbler». Obshchie ergonomicheskie trebovaniya [State Standard 22613-77 «Man–machine» system. Funibler switches and commutators. General ergonomic requirements]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1977. 5 p.

#### **Информация об авторах**

**Третьяков Евгений Александрович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: eugentr@mail.ru.

**Шляков Андрей Петрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: ShilyakovAP@omgups.ru.

**Соловьев Антон Николаевич**, аспирант кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: Solovev.anton@mail.ru.

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

**Evgenii A. Tret'yakov**, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: eugentr@mail.ru.

**Andrei P. Shilyakov**, Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: ShilyakovAP@omgups.ru.

**Anton N. Solov'ev**, Ph.D. Student of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: Solovev.anton@mail.ru.

## Повышение энергоэффективности железнодорожного транспорта путем применения мобильных устройств поперечной емкостной компенсации

К.Д. Рубцов✉, Л.И. Жуйко

*Красноярский институт железнодорожного транспорта, г. Красноярск, Российская Федерация*

✉kirill.rubtsov.2001@mail.ru

### Резюме

Авторы статьи предлагают использовать мобильные устройства поперечной емкостной компенсации реактивной мощности для повышения энергоэффективности железнодорожного транспорта. В работе рассмотрена возможность сокращения существующих межпоездных интервалов движения тяжеловесных поездов по участку железной дороги Ачинск-I – Черноярченская Ачинской дистанции электроснабжения при применении поперечной емкостной компенсации реактивной мощности на посту секционирования Тарутино для увеличения наличной пропускной способности рассматриваемого железнодорожного участка. Проверка расчетов выполнена в программном комплексе «КОРТЭС». Проведенный расчет показывает, что при использовании мобильных устройств поперечной емкостной компенсации реактивной мощности на Красноярской железной дороге возможно повысить энергоэффективность расчетного участка Ачинской дистанции электроснабжения Ачинск-I – Черноярченская и увеличить его пропускную способность. Применение указанных мобильных устройств позволяет поднять уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава на 1,05–1,33 кВ и обеспечить движение грузовых поездов повышенной массы (до 7 100 т) в четном направлении при межпоездном интервале 14 мин. При включении второго силового трансформатора на тяговых подстанциях Ачинск-I и Черноярченская напряжение на токоприемнике электроподвижного состава увеличивается на 2,43–2,65 кВ, а межпоездной интервал уменьшается до 8–9 мин. Авторы считают, что результаты представленного расчета могут быть полезны для оптимизации работы железнодорожных систем и повышения их эффективности в целом.

### Ключевые слова

поперечная емкостная компенсация, реактивная мощность, профиль пути, пропускная способность, компенсирующее устройство, энергоэффективность

### Для цитирования

Рубцов К.Д. Повышение энергоэффективности железнодорожного транспорта путем применения мобильных устройств поперечной емкостной компенсации / К.Д. Рубцов, Л.И. Жуйко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 111–122. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).111-122.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 03.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 11.04.2024 г.; принята к публикации: 15.04.2024 г.

## Improving the energy efficiency of railway transport by using mobile devices of transverse capacitive compensation

K.D. Rubtsov✉, L.I. Zhuiko

*Krasnoyarsk Railway Transport Institute, Krasnoyarsk, the Russian Federation*

✉kirill.rubtsov.2001@mail.ru

### Abstract

The authors of the article propose the use of mobile devices for transverse capacitive compensation of reactive power to improve the energy efficiency of railway transport. The possibility of reducing the existing inter-train intervals of heavy trains along the section of the Achinsk-I–Chernorechenskaya railway of the Achinsk power supply distance is considered when using transverse capacitive compensation of reactive power at the Tarutino sectioning station to increase the available capacity of the railway section under consideration. The calculations were verified in the KORTES software package. The calculation performed in the KORTES software package shows that when using mobile devices for transverse capacitive compensation of reactive power on the Krasnoyarsk Railway, it allows to increase energy efficiency and increase the throughput of the calculated section of the Achinsk power supply distance Achinsk-I–Chernorechenskaya. The use of mobile reactive power compensation devices makes it possible to increase the voltage level on the current collector of electric rolling stock by 1,05–1,33 kV and ensure the movement of freight trains of increased mass (up to 7,100 tons) in an even direction with an inter-train interval of 14 minutes. When the second power transformer is turned on at the Achinsk-I and Chernorechenskaya traction substations, the voltage on the electric rolling stock current collector increases by 2,43–2,65 kV, and the inter-train interval decreases to 8–9 minutes. The authors of the article believe that the results of the calculation can be useful for optimizing the operation of railway systems and increasing their efficiency in general.



**Keywords**

transverse capacitive compensation, reactive power, track profile, throughput, compensating device, energy efficiency

**For citation**

Rubtsov K.D. Povyshenie energoeffektivnosti zheleznodorozhnogo transporta putem primeneniya mobil'nykh ustroystv poperechnoi emkostnoi kompensatsii [Improving the energy efficiency of railway transport by using mobile devices of transverse capacitive compensation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 111–122. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).111-122.

**Article Info**

Received: April 3, 2024; Revised: April 11, 2024; Accepted: April 15, 2024.

**Введение**

Одним из ключевых элементов железнодорожной системы является тяговое электроснабжение, которое во многом влияет на пропускную способность и надежность железнодорожного транспорта. Чтобы повысить эффективность работы и объемы перевозок, ОАО «РЖД» ставит перед собой стратегическую задачу увеличения массы и длины грузовых поездов. Однако это угрожает работе существующей системы тягового электроснабжения (СТЭ), которая была создана в 1950–1980 гг. для перевозок поездов весом до 4,5 тыс. т. Кроме того, существующая СТЭ Красноярской железной дороги работает в особом нагруженном режиме, что проявляется при увеличении грузопотока в Восточном направлении [1].

Для усиления системы тягового электроснабжения сравнительно малыми затратами используются установка поперечной емкостной компенсации реактивной мощности на постах секционирования (ПС) или на тяговых подстанциях (ТП). Они компенсируют реактивную мощность в тяговой сети (ТС) и повышают напряжение на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС), что повышает пропускную способность. На Красноярской железной дороге одним из наиболее сложных участков является перегон Ачинск-I – Чернореченская из-за его гористого профиля и затяжного подъема по второму пути.

Мобильные (передвижные) установки компенсации реактивной мощности являются альтернативой аналогичным стационарным установкам. Их использование имеет ряд преимуществ, потому что они могут применяться на всем участке железной дороги, что делает их более универсальными. Мобильные установки могут использоваться в качестве основных, где нет устройств компенсации, либо оказывать дополнительную компенсацию реактивной мощности во время путевых работ [2].

На расчетном железнодорожном участке Ачинской дистанции электроснабжения Ачинск-I – Чернореченская при существующем оборудовании тягового электроснабжения системы 25 кВ организовано движение 100 пар тяжеловесных поездов с наибольшей массой поезда в четном направлении – 7 100 т (с поездами в пакете 6 300 т), интервалом движения 15 мин. и в нечетном направлении – 4 000 т, с интервалом движения 12 мин.

Целью данной статьи является рассмотрение возможности применения мобильных (передвижных) устройств поперечной емкостной компенсации реактивной мощности в границах Ачинской дистанции электроснабжения.

В данной научной статье предлагается уменьшение межпоездных интервалов движения в четном направлении с 15 мин. до 8 за счет применения поперечной (параллельной) компенсации реактивной мощности (КУ) на ПС для поддержания минимально допустимого уровня напряжения в 21 кВ. Это позволит повысить провозную способность рассматриваемого участка железной дороги, что, в свою очередь, увеличит грузооборот. Также предлагается за счет установки поперечной компенсации реактивной мощности повысить энергоэффективность рассматриваемого участка Ачинской дистанции электроснабжения.

**Расчет основных показателей в программном комплексе «КОРТЭС»**

Расчеты были проведены в программном комплексе «КОРТЭС» при использовании пакетов для расчета различных режимов работы и определения наличной пропускной способности системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ, который предназначен для решения различных расчетных задач, связанных с выбором параметров, определением характеристик режимов и нагрузочной способности СТЭ и их отдельных элементов [3].

На рис. 1 изображен профиль пути расчетного участка Ачинск-I – Чернореченская. Схема анализируемого участка представлена на рис. 2.

Расчетный участок имеет двухстороннюю параллельную схему питания контактной сети (КС) и включает в себя одну межподстанционную зону (МПЗ) между двумя ТП Ачинск-I и ТП Чернореченская, на которой установлен ПС Тарутино и пункт параллельного соединения (ППС) Салырка. Расчетные значения наименьшего напряжения при исходной схеме представлены в табл. 1. В ней обозначены наименьшие напряжения в данное время и через 3 мин.

Питание тяговой нагрузки осуществляется от двух трансформаторов типа ТДТНЖ-40000/100-У1 ( $u_{кз} = 10,2\%$ ,  $S_{ном.тр.} = 40$  МВА). Первый предусмотрен для работы на тяговую нагрузку, а второй – резервный – включается в особо тяжелых режимах работы. Районная нагрузка трансформаторов отсутствует.  $S_{кз \text{ Ачинск}} = 3\,030$  МВА,  $S_{кз \text{ Черн.}} = 1\,497$  МВА.

Входное индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения (СВЭ), приведенное к сборным шинам распределительного устройства (РУ) напряжением 27,5 кВ относительно точки наименьшего напряжения  $U_{мин}$ , определяется в результате расчета тока короткого замыкания (КЗ) на шинах ПС по формуле (1), Ом [4]:

$$X'_{вх} = \frac{U_{xx}}{I_{кз \text{ мин}}} \cdot \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода на сборных шинах ТП – 27,5 кВ;  $I_{кз \text{ мин}}$  – ток КЗ в ординате с  $U_{мин}$  на токоприемнике ЭПС – 5,2 кА;  $\varphi$  – угол между  $U_{xx}$  и  $I_{кз \text{ мин}}$ . –75,3°.

Значение входного индуктивного сопротивления СВЭ и СТЭ относительно точки с  $U_{мин}$  составило 5,1 Ом.

Необходимая мощность КУ определяется по формуле (2), МВА [5]:

$$Q_{КУ} = \frac{U^2 \cdot (U_{мин. \text{ норм.}} - U_{мин. \text{ факт.}})}{U_{мин. \text{ норм.}} \cdot X'_{вх}}, \quad (2)$$

где  $U_{мин. \text{ норм.}}$  – минимальное нормированное напряжение в КС, принимаемое 21 кВ.

По результатам вычислений расчетная мощность КУ составила 9,32 МВАр.

Проверка не превышения напряжения в КС в период малого электропотребления производится при ограничении максимального напряжения в 29 кВ, принимаем минимально допустимое 21 кВ и номинальное напряжение на шинах ТП 27,5 кВ, а также фактическое напряжение 19,68 кВ [2]:  $21 - 19,68 \leq 29 - 27,5$  или  $1,32 < 1,5$  – условие выполняется.

Так как точка наименьшего напряжения отличается от точки ПС более чем на 2 км, то мощность КУ, полученную по формуле (2), требуется откорректировать [5] по формуле (3):

$$Q'_{КУ} = Q_{КУ} \left[ 1 + \frac{k_1 \cdot (L - L_k) \cdot X_{т.с.}}{k_1 \cdot L \cdot X_{т.с.} + 2 \cdot (k_1 + k_2) \cdot (X_c + X_{тр})} \right], \quad (3)$$

где  $L$  – расстояние от ПС до ТП, где находится точка  $U_{мин}$  – 22 км;  $L_k$  – расстояние от точки  $U_{мин}$  до ближайшей ТП – 19,6 км;  $X_c$  – входное индуктивное сопротивление (ИС) СВЭ – 0,55 Ом;  $X_{тр}$  – ИС трансформаторов ТП, ближайших к точке  $U_{мин}$  – 1,93 Ом;  $X_{т.с.}$  – удельное ИС ТС одного пути участка с  $U_{мин}$  – 0,222 Ом/км;  $k_1$  – коэффициент токораспределения присоединения КС ПС, питающего путь с точкой  $U_{мин}$  – 0,24;  $k_2$  – коэффициент токораспределения остальных присоединений ПС, питающих участки, до ординаты ТП, ближайшей к точке  $U_{мин}$  – 0,20. При этом:

$$X_c = \frac{U_{ном.}^2}{S_{кз}}; \quad X_{тр} = \frac{u_{кз} \cdot U_{ном.}^2}{S_{кз}}; \quad k_1 = \frac{I_{кз.с2}}{I_{кз.пс}};$$

$$k_2 = \frac{I_{кз.с5}}{I_{кз.пс}}.$$

Расчет коэффициентов распределения осуществляется на определении токов КЗ присо-

**Таблица 1.** Наименьшие напряжения без применения компенсирующих устройств реактивной мощности  
**Table 1.** The lowest voltages without the use of reactive power compensating devices

Участок Section	Путь Track	Напряжение, кВ Voltage, kV	
		$U_{мин}$	$U_{t=3 \text{ мин}}$
Ачинск-I – Чернореченская Achinsk-I–Chernorechenskaya	1-й	19,91	19,99
	2-й	19,68	19,75

единений ПС.  $I_{кз\text{ п.с.}} = 5\,423\text{ А}$  – модуль тока КЗ ПС.  $I_{кз\text{ С2}} = 1\,299\text{ А}$  – ток присоединения С2.  $I_{кз\text{ С5}} = 1\,061\text{ А}$  – ток смежного присоединения С4.

В результате расчетов мощность КУ с учетом корректировки, связанной с отличием точки наименьшего напряжения от точки ПС, принимается равной 9,68 МВАр.

Мощность КУ округляем до стандартных значений мощности промышленных КУ. К установке принимаем КУ с номинальной суммарной мощностью 11,5 МВАр, состоящей из двух блоков по 6,9 МВАр и 4,6 МВАр [6].

Результаты расчета наименьшего напряжения на участке с установленной КУ представлены в табл. 2.

Из табл. 2 можно сделать вывод, что использование КУ на ПС повышает напряжение в КС на всем протяжении участка МПЗ. На ТП напряжение повышается на величину  $\Delta U'$  в результате увеличения напряжения на шинах ТП, а на ПС на  $\Delta U''$  в результате повышения на ИС ТС [7].

Таким образом, из мероприятий по усилению СТЭ на участке Ачинск-I – Чернореченская к реализации можно предложить три варианта:

- применение на ПС Тарутино мобильной (передвижной) нерегулируемой КУ (НКУ) с размещением на двух железнодорожных платформах/автомобильных прицепах;
- применение на ПС Тарутино мобильной

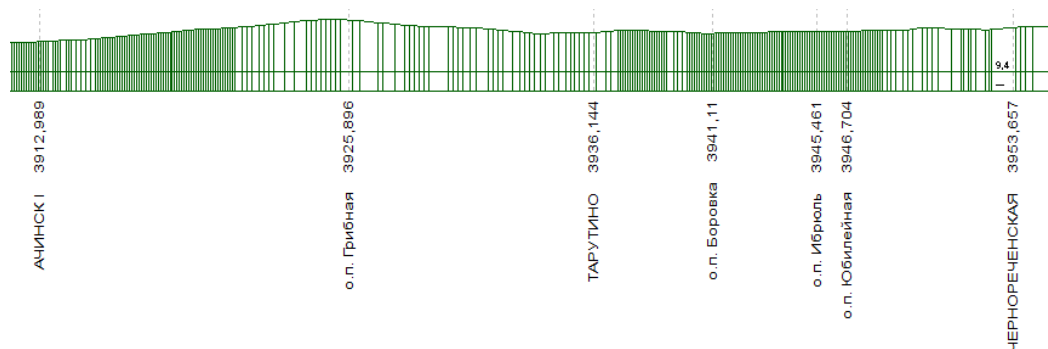


Рис. 1. Профиль пути Ачинск-I – Чернореченская  
Fig. 1. Profile of the Achinsk-I – Chernorechenskaya route

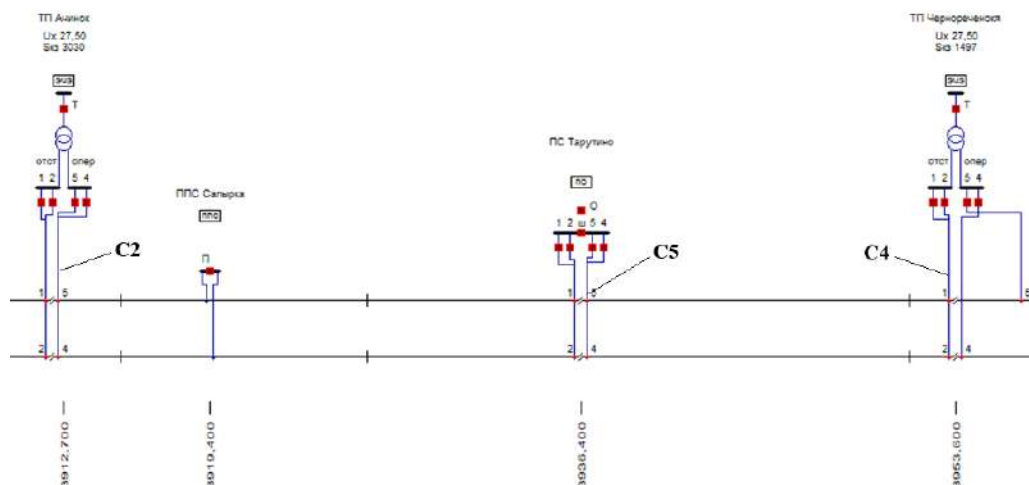


Рис. 2. Схема участка Ачинск-I – Чернореченская  
Fig. 2. Diagram of the Achinsk-I – Chernorechenskaya section

Таблица 2. Наименьшие напряжения с применением компенсирующих устройств реактивной мощности  
Table 2. The lowest voltages using reactive power compensating devices

Участок Section	Путь Track	Напряжение, кВ Voltage, kV	
		$U_{\min}$	$U_{t=3\text{ мин}}$
Ачинск-I – Чернореченская Achinsk-I – Chernorechenskaya route	1-й	21,43	21,54
	2-й	21,22	21,31

(передвижной) КУ с двухступенчатым регулированием (РКУ) с размещением на двух железнодорожных платформах/автомобильных прицепах;

– включение в параллельную работу на тяговую нагрузку второго трансформатора на ТП Ачинск-1 и ТП Чернореченская.

Одним из способов снижения потерь электрической энергии в ТС является снижение потребления реактивной мощности потребителями [8].

Реактивная мощность в установках переменного тока загружает обмотки машин, трансформаторов, провода линии. Кроме того, реактивный ток, протекая по элементам системы энергоснабжения, обладающей реактивным сопротивлением, вызывает дополнительную потерю напряжения на зажимах потребителя.

Наиболее распространенным способом уменьшения реактивной мощности служит ее компенсация, КУ способствуют улучшению показателей качества электроэнергии, улучшают режим напряжения в ТС, снижают несимметрию токов и напряжений [9–12].

Кроме того, КУ в СТЭ железных дорог решают многие задачи, среди которых:

– повышение пропускной способности железных дорог;  
– снижение потерь электрической энергии;

– повышение эффективности работы электрического оборудования.

Для участка железной дороги Ачинск-1 – Чернореченская предлагается использование мобильной НКУ с номинальной установленной мощностью 12 МВАр и полезной мощностью равной 9077-9180-9287-9395 кВАр (в зависимости от частоты настройки реактора, который настроен на фильтрацию третьей гармоники). Данная установка отличается простотой схемы исполнения, низкими капитальными вложениями на разработку и внедрение, меньшими габаритами и массой (по сравнению с РКУ). Однако НКУ имеет существенный недостаток: невозможность регулирования мощности компенсации реактивной мощности в широких пределах, что особенно важно при постоянно изменяющейся тяговой нагрузке. Данный недостаток выражается в необходимости полного отключения установки во время отсутствия нагрузки в сети для предотвращения повышения напряжения сверхдопустимого значения, что, в свою очередь, значительно снижает срок эксплуатации коммутационного оборудования (а именно, вакуумных выключателей).

Для защиты установки от переходных процессов, при которых наблюдаются броски тока и напряжения, предлагается использование схемы с двухэтапным пуском (рис. 3).

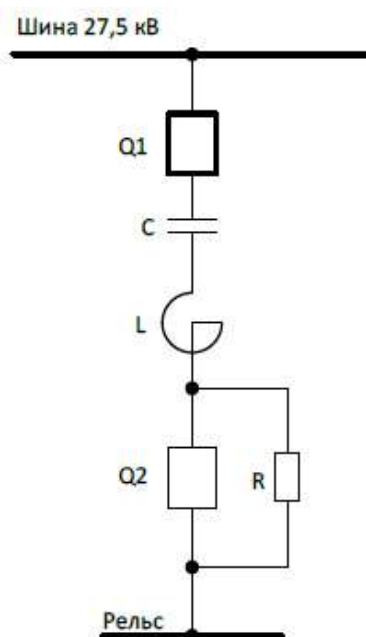


Рис. 3. Принципиальная схема нерегулируемой установки компенсации реактивной мощности  
Fig. 3. Schematic diagram of an unregulated reactive power compensation unit

Использование вакуумных выключателей позволяет решить проблему перенапряжений при отключении КУ. Однако перенапряжения, которые возникают при включении КУ, способны значительным образом влиять на надежную работу установки. Предлагаемая схема двухэтапного запуска способна ограничить перенапряжения до допустимых значений, а именно до  $1,2U_{ном}$  при использовании вакуумных выключателей и оптимальных значениях демпфирующего резистора.

Для снижения капитальных вложений, массы и габаритов установки предлагается в качестве второго выключателя использование выключателя на 10 кВ. Применение этого оборудования объясняется тем, что данный выключатель шунтирует демпфирующий резистор и не является основным. Такое оборудование соответствует всем требованиям, предъявляемым к проверке выключателей. Также данный выключатель будет дополнительно изолирован через опорные изоляторы, рассчитанные на напряжение 35 кВ, на которые будет устанавливаться ячейка 10 кВ, содержащая в себе выключатель и трансформатор тока. Так как все требования к выбору и проверке оборудования соблюдены, полагаем данный вариант приемлемым к исполнению.

Вторым вариантом, который может быть применен на участке Ачинск-I – Чернореченская – это использование РКУ, который состоит

из отдельных параллельно включенных секций, включаемых в зависимости от нагрузки в сети (является наиболее эффективным, так как мощность таких КУ можно подбирать в зависимости от постоянно изменяющейся тяговой нагрузки).

Для рассматриваемого участка предлагается использование КУ с двухступенчатым регулированием. Первая секция КУ с полезной мощностью 8 МВАр настроена на частоту третьей гармоники, вторая секция с мощностью 3,6 МВАр – на частоту пятой гармоники. При включении двух ступеней можно добиться суммарной полезной мощности установки 11,6 МВАр при одновременной фильтрации КУ третьей и пятой гармоник. Возможно также отдельное использование секций, поэтому формируются следующие три ступени мощности: 3,6, 8 и 11,6 МВАр.

Для двухступенчатой КУ были использованы конденсаторы типа КЭП2 – 1,05 – 150 – 2У1, реакторы ФРОС – 27,5 – 42/52 и ФРОС – 27,5 – 29/33. Первая секция установки имеет установленную мощность 9 000 кВАр, полезную мощность в 7 790 – 7 867 – 7 945 – 8 051 кВАр в зависимости от частоты настройки реактора, который настроен на фильтрацию третьей гармоники. Вторая секция настроена на фильтрацию пятой гармоники и имеет установленную мощность 4 500 кВАр при значениях полезной мощности приблизительно 3 600 кВАр в зави-

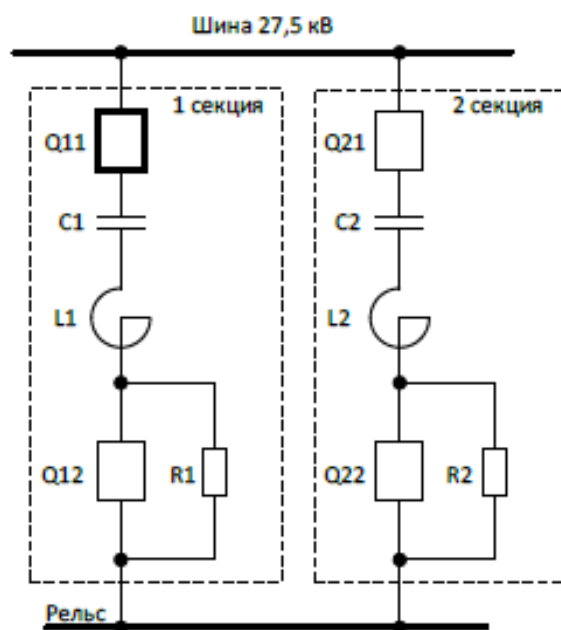


Рис. 4. Принципиальная схема регулируемой установки компенсации реактивной мощности  
Fig. 4. Schematic diagram of an adjustable reactive power compensation unit

симости от частоты резонанса. Принципиальная схема РКУ изображена на рис. 4.

Главным достоинством РКУ является ее способность подстраиваться под изменяющуюся нагрузку и эффективно использовать мощность для компенсации реактивной энергии. Однако данные установки отличаются высокой стоимостью, массой и сложностью проектирования [13]. Также в таких установках важнейшей проблемой является вопрос перенапряжений при коммутациях, которые происходят значительно чаще, чем в НКУ [14].

### Расчет нагрузок и пропускной способности участка Ачинск-I – Чернореченская

Для дальнейшего анализа проводится расчет нагрузок и пропускной способности участка Ачинск-I – Чернореченская. Расчет выполнен на основе моделируемого профиля пути расчетного участка, созданный по исходным данным участка (см. рис. 1). В результате тягового расчета были созданы типовые составы массами 4 000 и 7 100 т. Расчет был проведен для различных вариантов исходной схемы питания участка (см. рис. 2).

В настоящее время на расчетном участке применяются межпоездные интервалы равные 15 мин. для поездов массой 7 100 т в четном направлении и 12 мин. для поездов массой 4 000 т в нечетном направлении. Именно по этим данным строится график движения поездов в программном комплексе «КОРТЭС» (программный пакет «KGravDv») и проверяется пропускная способность, а также основные характеристики рабочего режима участка для по-

ездов различной массы, которые представлены в таблицах ниже.

Уровень напряжения на расчетном участке Ачинск-I – Чернореченская представлен в табл. 3.

Согласно приведенным данным (табл. 3) повышение уровня напряжения при использовании НКУ составляет примерно 1 кВ, при использовании РКУ – 1,24 кВ, для двух трансформаторов – 1,53 кВ, для двух трансформаторов с использованием НКУ и РКУ – 2,39 и 2,58 кВ соответственно.

По данным из табл. 4 можно сделать вывод об эффективности применения устройств поперечной компенсации реактивной мощности, так как доля суммарной скомпенсированной реактивной энергии для установки НКУ составляет 21 %, а для РКУ – 26 %, что в свою очередь благоприятно влияет на коэффициент мощности. Также при использовании КУ достигается более благоприятный режим работы трансформаторов за счет снижения коэффициента перегрузки, температуры обмоток трансформатора и трансформаторного масла, что увеличивает его срок эксплуатации.

В табл. 5 представлен расчет расхода электрической энергии ТП на выбранном участке Ачинск-I – Чернореченская исходной схемы, а также всех предложенных вариантов. По данной таблице можно определить, при какой схеме будет наименьший расход электрической энергии.

Таким образом, можно сделать вывод, что при применении РКУ 11,6 МВАр расход электрической энергии является самым

Таблица 3. Уровень напряжения на расчетном участке Ачинск-I – Чернореченская  
Table 3. Voltage level in the Achinsk-I – Chernorechenskaya railway section

Способ усиления Boost method	Путь Track	Напряжение, кВ Voltage, kV	
		$U_{\min}$	$U_{t=3 \text{ мин}}$
Исходная схема Initial scheme	1-й	20,72	20,86
	2-й	20,45	20,55
НКУ 9,3 МВАр	1-й	21,61	21,76
	2-й	21,51	21,60
РКУ 11,6 МВАр	1-й	21,85	22,00
	2-й	21,79	21,88
Два трансформатора Two transformers	1-й	22,17	22,33
	2-й	22,02	22,13
НКУ 9,3 МВАр + Два трансформатора	1-й	23,05	23,20
	2-й	22,85	22,98
РКУ 11,6 МВАр + Два трансформатора	1-й	23,26	23,37
	2-й	23,08	23,20

наименьшим (по сравнению с другими возможными вариантами).

### Оценка пропускной способности участка

В СТЭ определяющими факторами для оценки пропускной способности и планирования мероприятий по усилению существующих технических средств являются масса поезда, количество поездов, характер их прохождения,

а также межпоездной интервал [15–18]. СТЭ должна иметь соответствующую грузоподъемность на участках движения большегрузных поездов. При прохождении поездов с массой более 6 000 т токовая нагрузка в системе значительно возрастает и, как следствие, происходит более интенсивный нагрев оборудования, снижается уровень напряжения в КС и увеличиваются потери мощности [19, 20].

**Таблица 4.** Расход активной, реактивной мощности, коэффициент реактивной мощности на ТП Ачинск-I, ТП Чернореченская и на межподстанционной зоне

**Table 4.** Consumption of active, reactive power, reactive power coefficient at the Achinsk-I TP, Chernorechenskaya TP and at the inter-substation zone

Способ усиления Boost method	Тяговая подстанция Traction substation	Расход электроэнергии Power consumption			tgφ	cosφ	$k_{\text{пер}}$	Температура, °С Temperature, °С	
		Активной, кВт · ч Active, kVt-h	Реактивной, кВАр · ч Reactive kvar-h	обмоток of wind- ings				масла of oil	
Исходная схема Initial scheme	Ачинск-I	219 296	263 164	0,625	0,64	1,20	121	96	
	Чернореченская	275 603	366 141	0,871	0,6	1,62	137	106	
	Межподстанционная зона	494 899	800 593	1,62	0,53	–	–	–	
НКУ 9,3 МВАр	Ачинск-I	229 811	189 859	0,83	0,77	1,09	100	82	
	Чернореченская	281 364	260 725	0,93	0,73	1,50	114	91	
	Межподстанционная зона	511 175	681 414	1,33	0,60	–	–	–	
РКУ 11,6 МВАр	Ачинск-I	232 765	169 959	0,73	0,81	1,06	98	80	
	Чернореченская	283 085	232 321	0,82	0,77	1,46	110	87	
	Межподстанционная зона	515 850	654 164	1,27	0,62	–	–	–	
Два трансформатора Two transformers	Ачинск-I	225 419	270 013	1,20	0,64	0,59	71	65	
	Чернореченская	294 814	390 940	1,33	0,60	0,92	85	74	
	Межподстанционная зона	520 233	841 131	1,62	0,53	–	–	–	
НКУ 9,3 МВАр + два трансформатора	Ачинск-I	235 660	195 408	0,83	0,77	0,53	69	65	
	Чернореченская	293 527	270 704	0,92	0,74	0,83	77	69	
	Межподстанционная зона	529 187	705 194	1,33	0,60	–	–	–	
РКУ 11,6 МВАр + два трансформатора	Ачинск-I	238 618	175 685	0,74	0,81	0,52	69	65	
	Чернореченская	293 532	239 347	0,82	0,78	0,81	76	67	
	Межподстанционная зона	532 150	674 859	1,27	0,62	–	–	–	

**Таблица 5.** Расход электрической энергии ТП на расчетном участке Ачинск-I – Чернореченская

**Table 5.** The consumption of electrical energy of the TP in the settlement section Achinsk-I – Chernorechenskaya

Расход электроэнергии Power consumption	Исходная схема Initial scheme	НКУ 9,3 МВАр	РКУ 11,6 МВАр	Два трансформатора Two transformers	НКУ 9,3 МВАр + два трансформа- тора	РКУ 11,6 МВАр + два трансформа- тора
Активная, кВт · ч Active, kVt-h	9 157 000	940 884	948 497	1 025 111	1 045 751	1 051 782
Реактивная, кВАр · ч Reactive kvar-h	10 777 000	921 541	882 346	1 196 280	1 023 410	979 167

Производим расчет наличной пропускной способности грузовых поездов для расчетной схемы участка Ачинск-I – Чернореченская до усиления СТЭ и предлагаемыми вариантами усиления. Результаты расчетов сводим в табл. 6.

В табл. 7 в программном комплексе «КОРТЭС» рассчитаны минимальные допустимые интервалы при пропуске поездов повышенной массы на расчетном участке Ачинск-I –

Чернореченская. Можно увидеть, какой аспект влияет на большой интервал на расчетном участке дороги.

Согласно приведенным данным (см. табл. 7) расчетных межпоездных интервалов можно сделать вывод, что на рассматриваемом участке ограничивающим параметром пропускной способности перегона является мощность понижающего трансформатора, следовательно,

**Таблица 6.** Наличная суточная пропускная способность при пропуске поездов повышенной массы для нечетного и четного направлений расчетного участка Ачинск-I – Чернореченская

**Table 6.** Available daily capacity for passing high-mass trains for odd and even directions of the settlement section Achinsk-I – Chernorechenskaya

Межподстанционная зона Intersubstation zone	Наличная суточная пропускная способность, ограниченная Available daily capacity, limited			Итоговый Final
	Понижительный трансформатор Step-down transformer	Напряжение, кВ Voltage, kV	Нагрев проводов контактной сети Heating of of the contact network wires	
До усиления Previous to boost	60/56	74/69	159/150	60/56
НКУ 9,3 МВАр	68/64	87/82	159/150	68/64
РКУ 11,6 МВАр	70/66	87/82	159/150	70/66
Два трансформатора Two transformers	106/100	106/100	159/150	106/100
НКУ 9,3 МВАр + два трансформатора	120/112	106/100	159/150	106/100
РКУ 11,6 МВАр + два трансформатора	120/112	120/112	159/150	120/112

**Таблица 7.** Минимальные допустимые интервалы при пропуске поездов повышенной массы на расчетном участке Ачинск-I – Чернореченская

**Table 7.** Minimum allowable intervals for passing heavy trains on the calculated section Achinsk-I – Chernorechenskaya

Наименование межподстанционной зоны Name of substation zone	Значение интервала (мин), ограниченное Interval value (min), limited			Результирующее значение Resulting value
	Мощностью понизительного трансформатора By power of step-down transformer	Напряжением в контактной сети By voltage in contact network	Нагревом проводов контактной сети By heating of contact network wires	
До усиления Previous to boosting	16	13	6	16
НКУ 9,3 МВАр	14	11	6	14
РКУ 11,6 МВАр	14	11	6	14
Два трансформатора Two transformers	9	9	6	9
НКУ 9,3 МВАр + два трансформатора	8	9	6	9
РКУ 11,6 МВАр + два трансформатора	8	8	6	8



при включении второго силового трансформатора в параллельную нагрузку на каждой из ТП наблюдается рост пропускной способности, который значительно повлияет на экономический эффект от прироста грузооборота (будет рассчитан в дальнейшем).

Проанализировав таблицы, можно сделать вывод, что по результатам расчета наличная суточная пропускная способность грузовых поездов от усиления составила 60 пар поездов в сутки в нечетном направлении и 56 пар поездов в четном. Расчетный межпоездной интервал составляет 16 мин.

Также можно указать, что мероприятия по усилению СТЭ участка Ачинск-I – Чернореченская обеспечили пропуск поездов с межпоездным интервалом 8 мин. В результате усиления и сокращения интервалов возросла наличная суточная пропускная способность грузовых поездов повышенной массы – 120 пар поездов в нечетном направлении и 112 пар в четном.

### Заключение

Таким образом, в результате расчетов в программном комплексе «КОРТЭС» по поддержанию минимально допустимого уровня напряжения на токоприемниках ЭПС на участке Ачинск-I – Чернореченская при проследовании тяжеловесных поездов с заданным графиком движения не ниже 21 кВ необходима установка КУ номинальной мощностью 11,5 МВАр на ПС Тарутино. Данное усиление устройств тягового электроснабжения позволит осуществить пропуск пакетов тяжеловесных поездов заданной массы с минимальным межпоездным интервалом для четного направления 12 мин., нечетного – 10 мин. Дальнейшее усиление расчетного участка возможно при помощи установки поперечной компенсации реактивной мощности с мощностью не менее 9,6 МВАр, установки КУ с мощностью не менее 4,6 МВАр на ТП Ачинск-I, а также за счет включения в параллельную работу второго трансформатора на ТП Ачинск-I и ТП Чернореченская.

В научной статье была проанализирована возможность установки устройств поперечной компенсации реактивной мощности на основе железнодорожных платформ. Было предложено два варианта установки компенсации:

– нерегулируемая установка поперечной компенсации с номинальной установленной мощностью 12 МВАр, выполненная на базе двух железнодорожных платформ;

– установка поперечной компенсации с двухступенчатым регулированием и номинальной суммарной установленной мощностью двух секций 13,5 МВАр, также выполненная на базе двух железнодорожных платформ.

Для расчета пропускной способности для различных схем усиления расчетного участка с применением передвижных устройств компенсации использовался программный комплекс «КОРТЭС». Также был проведен расчет уровня напряжения, который обеспечивает применение различных методов усиления на расчетном участке Ачинск-I – Чернореченская.

Применение передвижных устройств компенсации реактивной мощности позволяет повысить уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава на 1,05–1,33 кВ и обеспечить движение грузовых поездов повышенной массы (до 7 100 т) в четном направлении при межпоездном интервале 14 мин. При включении второго силового трансформатора на тяговых подстанциях Ачинск-I и Чернореченская напряжение на токоприемнике ЭПС повышается на 2,43–2,65 кВ, а межпоездной интервал уменьшается до 8–9 мин.

Мобильные устройства поперечной емкостной компенсации реактивной мощности являются альтернативой аналогичным стационарным установкам. Их применение имеет ряд преимуществ, так как они могут быть использованы на всем участке железной дороги, что делает их более универсальными. Передвижные установки могут задействоваться в качестве основных, где нет устройств компенсации, либо оказывать дополнительную компенсацию реактивной мощности во время путевых работ.

### Список литературы

1. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М. : УМЦ ЖДТ, 2015. 316 с.
2. СТО РЖД 07.022.2–2015. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения и мощности средств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности. Введ. 2016–01–01. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.

3. Рубцов К.Д., Чинков П.О. Применение продольной и поперечной компенсации на станции Минино // Молодежная наука : тр. XXVI Всерос. студен. науч.-практ. конф. Красноярск, 2022. Т. 1. С. 138–141.
4. Общие методы выбора параметров и оценки эффективности применения устройств компенсации реактивной мощности в тяговой сети переменного тока : утв. совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 27–30 октября 2015. URL : <https://osjd.org/api/media/resources/9705> (Дата обращения 29.03.2024).
5. Безопасность жизнедеятельности в условиях производства. Расчеты / Т.А. Бойко, Е.Б. Воробьев, Ж.Б. Ворожбитова и др. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2007. 127 с.
6. Герман Л.А., Серебряков А.С. Снижение потерь электроэнергии при помощи установок компенсации реактивной мощности на посту секционирования тяговой сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 5. С. 297–302.
7. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М. : ЭНАС, 2009. 456 с.
8. Карта технологического процесса № 2/23. Устройство компенсации реактивной мощности УКРМ-27,5 кВ. Текущий ремонт : утв. расп. Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД» №ТЭ-72/р от 10.04.2023 // Сборник карт технологических процессов на работы по содержанию тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств систем тягового электроснабжения. Кн. I. М. : ОАО «РЖД», 2021. 622 с.
9. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Альянс, 2019. 528 с.
10. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. М. : МЭИ, 2012. 335 с.
11. Инструкция по монтажу стационарных аккумуляторных батарей и конденсаторных установок : утв. тех. директором Концерна «Электромонтаж» от 29.05.1992. Введ. 1993–01–01. URL : <https://energoboard.ru/information/171/> (Дата обращения 28.03.2024).
12. Правила техники безопасности при электромонтажных и наладочных работах / Ю.А. Войлошников, Б.М. Дидух, А.С. Дружинин и др. М. : Энергоатомиздат, 1992. 192 с.
13. Саитбаталова Р.С., Ившин И.В. Некоторые вопросы компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 1-2. С. 77–81.
14. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1983. 183 с.
15. Луковенко А.С., Туйгунова А.Г. Методы повышения надежности и качества электроэнергии тяговых подстанций с применением компьютерных технологий. М. : Русайнс, 2018. 98 с.
16. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. Томск : ТПУ, 2012. 234 с.
17. Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург : УрГУПС, 2014. 431 с.
18. Поперечно-емкостная компенсация // Studfiles : сайт. URL: <https://studfile.net/preview/7312126/page/6/> (Дата обращения 01.04.2024).
19. Продольная и поперечная компенсация реактивной мощности // Мегавар : сайт. URL : <https://megavarm.ru/articles/prodolnaya-i-poperechnaya-kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti.html> (Дата обращения 01.04.2024).
20. Компенсация реактивной мощности // «Хомов электро» : сайт. URL: <https://khomovelectro.ru/articles/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti.html> (Дата обращения 01.04.2024).

## References

1. German L.A., Serebryakov A.S. Reguliruemye ustanovki emkostnoi kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Adjustable capacitive compensation installations in railway traction power supply systems]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 2015. 316 p.
2. STO RZhD 07.022.2–2015. Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoi dorogi peremennogo toka. Metodika vybora mest razme-shcheniya i moshchnosti sredstv prodol'noi i poperechnoi kompensatsii reaktivnoi moshchnosti [Standard of JSC «Russian Railways» 07.022.2–2015. The traction power supply system of the AC railway. The method of selecting the locations and power of the means of longitudinal and transverse reactive power compensation].
3. Rubtsov K.D., Chinkov P.O. Primenenie prodol'noi i poperechnoi kompensatsii na stantsii Minino [Application of longitudinal and transverse compensation at the Minino station]. *Trudy XXVI Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Molodezhnaya nauka»* [Proceedings of the XXVI All-Russian Student Scientific and Practical Conference «Youth science»]. Krasnoyarsk, 2022, Vol. 1, pp. 138–141.
4. Obshchie metody vybora parametrov i otsenki effektivnosti primeneniya ustroystv kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v tyagovoi seti peremennogo toka: utv. soveshchaniem Komissii OSZhD po infrastrukture i podvizhnomu sostavu 27–30 oktyabrya 2015 [General methods for selecting parameters and evaluating the effectiveness of reactive power compensation devices in an AC traction network: approved by the meeting of the organization of railway cooperation Commission on Infrastructure and Rolling Stock on October 27–30, 2015]. Available at: <https://osjd.org/api/media/resources/9705> (Accessed March 29, 2024).
5. Boiko T.A., Vorob'ev E.B., Vorozhbitova Zh.B., Kolomiitseva L.I., Kotlyarova E.A., Lobanova M.K., Pavlenko Yu.V., Pereverzev I.G., Finochenko T.A., Kharchenko N.N., Khvostikov A.G. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti v usloviyakh proizvodstva. Raschety [Life safety in production conditions. Calculations]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2007. 127 p.
6. German L.A., Serebryakov A.S. Snizhenie poter' elektroenergii pri pomoshchi ustanovok kompensatsii reaktivnoi moshchnosti na postu sektionirovaniya tyagovoi seti peremennogo toka [Reduction of electricity losses using reactive power compensation units at the AC traction network partitioning station]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the Scientific and Research

Institute of Railway Transport], 2019, Vol. 78, no 5, pp. 297–302.

7. Zhelezko Yu.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii. Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Power losses. Reactive power. The quality of electricity. A guide for practical calculations]. Moscow: ENAS Publ., 2009. 456 p.

8. Karta tekhnologicheskogo protsessa № 2/23. Ustroystvo kompensatsii reaktivnoi moshchnosti UKRM-27,5 kV. Tekushchii remont: utv. rasp. Transenergo – filial OAO «RZhD» №TE-72/r ot 10.04.2023 [Process map No 2/23. The reactive power compensation device UKRM-27.5 kV. Current repairs: approved by order Transenergo – branch of JSC «Russian Railways» No TE-72/r dated April 10, 2023]. *Sbornik kart tekhnologicheskikh protsessov na raboty po sodержaniyu tyagovykh podstantsii, transformatornykh podstantsii i lineinykh ustroystv sistemy tyagovogo elektroabzheniya. Kniga I* [Collection of process maps for work on the maintenance of traction substations, transformer substations and linear devices of the traction power supply system. Book I]. Moscow: OAO «RZhD» Publ., 2021. 622 p.

9. Markvardt K.G. Elektroabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Power supply of electrified railways]. Moscow: Al'yans Publ., 2019. 528 p.

10. Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. Upravlenie potokami elektroenergii i povyshenie effektivnosti elektroenergeticheskikh sistem [Electric power flow management and efficiency improvement of electric power grid systems]. Moscow: MEI Publ., 2012. 335 p.

11. Instruktsiya po montazhu statsionarnykh akkumulyatornykh batarei i kondensatornykh ustanovok: utverzhdena tekhnicheskim direktorom Kontserna «Elektromontazh» ot 29.05.1992 [Installation instructions for stationary batteries and capacitor banks: approved by technical Director of the Concern «Elektromontazh» dated May 29, 1992]. Available at: <https://energoboard.ru/information/171/> (Accessed March 28, 2024).

12. Voiloshnikov Yu.A., Didukh B.M., Druzhinin A.S., Zarzhitskii N.I., Ivanov G.I., Kipnis B.M., Kovalev A.P., Landesman E.I., Martynenko V.I., Mostvilikher A.M., Tartakovskii Yu.S., Filatov A.A., Shneiderman N.I. [Safety rules for electrical installation and commissioning]. Moscow: Ergoatomizdat Publ., 1992. 192 p.

13. Saitbatalova R.S., Ivshin I.V. Nekotorye voprosy kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v sisteme elektroabzheniya promyshlennogo predpriyatiya [Some issues of reactive power compensation in the power supply system of an industrial enterprise]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [News of higher educational organizations. Energy problems], 2012, no 1-2, pp. 77–81.

14. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Condenser installations of electrified railways]. Moscow: Transport, 1983. 183 p.

15. Lukovenko A.S., Tuigunova A.G. Metody povysheniya nadezhnosti i kachestva elektroenergii tyagovykh podstantsii s primeneniem komp'yuternykh tekhnologii [Methods for improving the reliability and quality of electric power of traction substations using computer technologies]. Moscow: Rusains Publ., 2018. 98 p.

16. Kabyshev A.V. Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriyatii [Reactive power compensation in electrical installations of industrial enterprises]. Tomsk: TPU Publ., 2012. 234 p.

17. Ter-Oganov E.V., Pyshkin A.A. Elektroabzhenie zheleznykh dorog [Power supply of railways]. Ekaterinburg: UR-GUPS Publ., 2014. 431 p.

18. Poperechno-emkostnaya kompensatsiya (Elektronnyi resurs) [Transverse-capacitive compensation (Electronic Resource)]. Available at: <https://studfile.net/preview/7312126/page:6/> (Accessed April 1, 2024).

19. Prodol'naya i poperechnaya kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti (Elektronnyi resurs) [Longitudinal and transverse reactive power compensation (Electronic resource)]. Available at: <https://megavarm.ru/articles/prodolnaya-i-poperechnaya-kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti.html> (Accessed April 1, 2024).

20. Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti (Elektronnyi resurs) [Reactive power compensation (Electronic Resource)]. Available at: <https://khomovelectro.ru/articles/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti.html> (Accessed April 1, 2024).

### Информация об авторах

**Рубцов Кирилл Дмитриевич**, кафедра систем обеспечения движения поездов, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; e-mail: kirill.rubtsov.2001@mail.ru.

**Жуйко Леонид Иванович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем обеспечения движения поездов, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск; e-mail: zhujko49@mail.ru.

### Information about the authors

**Kirill D. Rubtsov**, Department of Train Traffic Support Systems, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – Branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: kirill.rubtsov.2001@mail.ru.

**Leonid I. Zhuiko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Train Traffic Support Systems, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – Branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk; e-mail: zhujko49@mail.ru.

## Моделирование и анализ токов короткого замыкания системы тягового электроснабжения 1×25 кВ в программе SimInTech на различных ступенях регулирования напряжения устройства РПН

И.А. Худоногов, А.А. Галков✉

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

✉galkov16@gmail.com

### Резюме

Расчеты токов короткого замыкания в системах тягового электроснабжения выполняют для правильного подбора характеристик оборудования как контактной сети, так и тяговых подстанций. Такие расчеты также необходимы для правильного выбора и настройки устройств релейной защиты. Поэтому моделирование режима короткого замыкания актуально. Короткое замыкание – аварийный режим, представляющий опасность для оборудования, и неправильный подбор характеристик влечет моментальный выход из строя устройств при первом же коротком замыкании. Важно выполнять расчет режима короткого замыкания наиболее точно, учитывая множество факторов и аппаратов, которые могут повлиять на протекающие токи. Одним из таких аппаратов является устройство регулирования напряжения под нагрузкой, позволяющее регулировать напряжение на обмотке низшего напряжения тягового трансформатора без вывода его из работы. Для моделирования режима короткого замыкания с учетом возможного изменяемого напряжения была выбрана среда динамического моделирования SimInTech. Данная программа помогает создавать комбинированные модели, учитывающие большое количество факторов, в том числе переходные процессы, которые могут возникать при коротких замыканиях. В результате проведенного моделирования получены осциллограммы токов в точке короткого замыкания на вводах высшего напряжения тягового трансформатора, фидерах контактной сети и непосредственно в точке короткого замыкания. В статье дается оценка программы как среды для моделирования систем тягового электроснабжения, анализируется влияние регулирования напряжения под нагрузкой на токи короткого замыкания и действие токов короткого замыкания на устройстве регулирования напряжения под нагрузкой.

### Ключевые слова

система тягового электроснабжения, моделирование, устройство регулирования под напряжением, короткое замыкание, тяговый трансформатор, контактная сеть

### Для цитирования

Худоногов И.А. Моделирование и анализ токов короткого замыкания системы тягового электроснабжения 1×25 кВ в программе SimInTech на различных ступенях регулирования напряжения устройства РПН / И.А. Худоногов, А.А. Галков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 123–132. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).123-132.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 03.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 10.04.2024 г.; принята к публикации: 12.04.2024 г.

## Modeling and analysis of short-circuit currents of a 1×25 kV traction power supply system in the SimInTech program at various stages of voltage regulation of the OLTC device

I.A. Khudonogov, A.A. Galkov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉galkov16@gmail.com

### Abstract

Calculations of short-circuit currents in traction power supply systems are performed for the correct selection of equipment characteristics of both the contact network and traction substations. In addition, such calculations are necessary for the correct selection and configuration of relay protection devices. Therefore, modeling the short circuit mode is relevant. Short circuit is an emergency mode that is dangerous for the equipment, and incorrect selection of characteristics entails instant failure of the equipment at the first short circuit. It is important to calculate the short circuit mode most accurately, taking into account the many factors and devices that can affect the flowing currents. One of these devices is a voltage regulation device under load, which allows to adjust the voltage on the lowest voltage winding of a traction transformer without disabling it. The SimInTech dynamic simulation environment was chosen to simulate the short circuit mode, taking into account the possible variable voltage. This program allows to create combined models that take into account many factors, including transients, which in particular occur during short circuits. As a result of the simulation, oscillograms of

currents at the short-circuit point, at the inputs of the high voltage of the traction transformer, on the feeders of the contact network and directly at the short-circuit point were obtained. The article evaluates the program as an environment for modeling traction power supply systems, analyses the effect of voltage regulation under load on short-circuit currents and the effect of short-circuit currents on the reliability of a voltage regulation device under load.

### Keywords

traction power supply system, modeling, voltage regulation device, short-circuit, traction transformer, contact network

### For citation

Khudonogov I.A., Galkov A.A. Modelirovanie i analiz tokov korotkogo замыкания системы тягового электроснабжения 1×25 kV v programme SimInTech na razlichnykh stupenyakh regulirovaniya napryazheniya ustroystva RPN [Modeling and analysis of short-circuit currents of a 1×25 kV traction power supply system in the SimInTech program at various stages of voltage regulation of the OLTC device]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 123–132. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).123-132.

### Article Info

Received: April 3, 2024; Revised: April 10, 2024; Accepted: April 12, 2024.

### Введение

Расчеты токов короткого замыкания (КЗ) необходимы для определения параметров обслуживания как контактной сети, так и тяговых подстанций. При этом необходимо учитывать множество факторов, включая характеристики контактной сети, тип и мощность тяговых трансформаторов, схему подключения и параметры релейной защиты, наличие устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Одним из факторов, существенно влияющим на величину токов короткого замыкания, является присутствие в системе тягового электроснабжения устройства РПН, предназначенного для регулирования напряжения на обмотке высокого напряжения тягового трансформатора без вывода его из работы. При регулировании напряжения переключением ответвлений обмоток трансформаторов изменяют их коэффициент трансформации.

Для моделирования режима КЗ с учетом возможного изменения напряжения, обусловленного работой РПН, была выбрана среда динамического моделирования SimInTech. Эта программа позволяет создавать комбинированные модели, учитывающие множество факторов, в том числе переходные процессы, возникающие при КЗ. В результате моделирования были получены выводы, анализ которых позволил оценить влияние РПН на токи КЗ. Было установлено, что при работе РПН токи КЗ могут существенно изменяться в зависимости от положения переключателя РПН.

В рамках исследования была оценена надежность РПН при возникновении КЗ. Проведенное моделирование режима КЗ с учетом устройства РПН позволило получить значимые

результаты и сделать заключения о том, что РПН существенно влияет на токи КЗ и его необходимо учитывать при проектировании систем тягового электроснабжения. Программное обеспечение SimInTech является эффективным инструментом для моделирования систем тяги электроснабжения, в частности – для проведения расчетов токов КЗ.

Также стоит отметить, что токи КЗ влияют на надежность РПН, поэтому немаловажным аспектом исследования является разработка мероприятий по увеличению устойчивости к аварийным режимам данного устройства.

Целью статьи является рассмотрение путей повышения надежности технической эксплуатации силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций с устройствами РПН в среде динамического моделирования технических систем SimInTech.

### Режим короткого замыкания

КЗ в контактной сети – это аварийный режим работы, при котором величина тока многократно превышает его номинальный размер, из-за чего происходит значительное падение напряжения. Причиной возникновения является непосредственное соединение контактной сети (фаза А или В) с рельсовой цепью, подключенной к отсасывающему проводу (фаза С).

Примерами возникновения такого режима могут являться обрывы проводов или тросов контактных подвесок из-за их износа, набросы проволоки на контактный провод, нарушение изоляции контактной сети и даже неисправности на подвижном составе.

КЗ бывают устойчивые и неустойчивые. Также при КЗ возможно появление дуги, что

приводит к дуговому пробою [1, 2].

Любое КЗ приводит к отжигу проводов, повреждениям электрооборудования, поэтому анализ данного режима актуален для дальнейшего изучения способов выявления местонахождения КЗ выбора характеристик аппаратов и проводников проектирования и настройки устройств релейной защиты и комплексного изучения работы системы электроснабжения.

Особо опасны для электроустановок и их узлов ударные нагрузки и возникающий вследствие этого ударный ток. Устройство РПН не является исключением, в процессе работы устройства в нормальном и особенно в аварийном режимах токи протекают через контактор и избиратель, что приводит к нагарам и локальным нагревам этих узлов. В результате протекания больших значений тока происходит нагрев изоляции, что влечет за собой ухудшение ее диэлектрических свойств. Поэтому необходимо исключить возможность переключения устройства при протекании тока большой величины, так как возникающие дуговые явления влекут за собой дополнительный износ контактов [3, 4].

Под ударным током КЗ  $I_y$  понимают наибольшее мгновенное значение полного тока КЗ в фазе через 0,01 с после возникновения КЗ:

$$i_y = i_{k(0,01)} = \pm I_{nm} \cos \omega t_{0,01} \pm I_{nm} e^{-0,01/T_a}. \quad (1)$$

Из формулы (1) получим:

$$i_y = I_{nm} + I_{nm} e^{-0,01/T_a} = I_{nm} \cdot K_y,$$

где

$$K_y = 1 + e^{-0,01/T_a},$$

является ударным коэффициентом. Он показывает во сколько раз ударный ток КЗ больше начальной амплитуды периодической слагающей тока КЗ.

Если принять  $T_a = 0,05$  с, то  $K_y = 1,8$ . Рассматривая возможные пределы изменения  $K_y$  для электрических цепей с активно-индуктивным характером, получим:

– если  $L_k = 0$ , то  $T_a = 0$ , отсюда следует, что  $K_y = 1 + e^{-\infty} = 1$ ;

– если  $r_k = 0$ , то  $T_a = \infty$ , отсюда следует, что  $K_y = 1 + e^{-0,01/\infty} = 2$ .

Таким образом, получаем, что величина ударного коэффициента может находиться в пределах 1–2.

Под действующим значением полного тока КЗ понимают среднеквадратичный ток КЗ

за период, в центре которого расположен рассматриваемый момент времени. Значение этого тока определяют по выражению:

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_{kt}^2 dt}. \quad (2)$$

Если в формуле (2) значение  $i_{kt}$  выразить через составляющие  $i_{akt}$ ,  $i_{nkt}$  и произвести преобразования, то получим следующее:

$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2}, \quad (3)$$

где  $I_{nt}$  – действующее значение периодической слагающей тока КЗ;  $I_{at}$  – действующее значение аperiodической слагающей тока КЗ в момент времени  $t$ .

При этом мы можем записать:

$$I_{nt} = I_{nm}/2; I_{at} = i_{at}.$$

Практический интерес представляет действующее значение тока КЗ в течение первого периода КЗ, а именно в том периоде времени, где расположен ударный ток КЗ. В таком случае действующее значение тока КЗ принято обозначать  $I_y$ .

Согласно формуле (3) можно записать следующее:

$$I_t = \sqrt{I_n^2 + I_{a(0,01)}^2},$$

где  $I_{a(0,01)} = I_n$  (так как цепь с КЗ подключена к источнику неограниченной мощности);

$$I_{a(0,01)} = -I_{nm} \cdot e^{-0,01/T_a} = \sqrt{2} I_n \cdot e^{-0,01/T_a}.$$

Тогда

$$I_y = I_n \sqrt{1 + \frac{2}{(K_y - 1)^2}}. \quad (4)$$

Зная, что  $K_y$  может изменяться от 1 до 2, получаем, что  $I_y$  по формуле (4) может находиться в пределах:

$$I_n \leq I_y \leq \sqrt{3} I_n.$$

Как мы видим из формул, действующее значение ударного тока КЗ может находиться в определенном диапазоне, а если добавить к этому переключаемые уровни напряжения (благодаря РПН), то разброс величины ударного тока становится очень большим.

### Среда динамического моделирования SimInTech

Расчет режима КЗ в системе тягового электроснабжения позволяет выполнить программный комплекс «КОРТЭС», однако режим характеризуется переходными процессами, которые невозможно визуализировать в данном

программном комплексе. Поэтому для моделирования режима КЗ было решено выбрать среду динамического моделирования SimInTech.

SimInTech (сокр. от Simulation In Technic) является разработкой ООО «ЗВ Сервис». Это универсальная среда, позволяющая разрабатывать математические модели, различные алгоритмы управления и исследовать динамические процессы. Данная среда помогает производить моделирование в разных отраслях (в том числе в электроэнергетике) и даже комбинировать их при необходимости.

Проектирование в данной среде происходит в виде логико-динамических систем, которые описываются входными и выходными соотношениями как системы дифференциальных уравнений или дифференциально-алгебраические уравнения. Для расчета электрических процессов в программе существуют две библиотеки: ЭЦ-Динамика и ЭЦ-Статика.

ЭЦ-Статика при моделировании производит расчеты в виде комплексных чисел действующих значений токов и напряжений. Синусоидальные сигналы заменяются постоянными, значение которых равно  $\sqrt{2}/2$  от амплитудного значения синусоиды.

Данная библиотека применяется для установившихся режимов больших энергетических систем, или переходных процессов, дли-

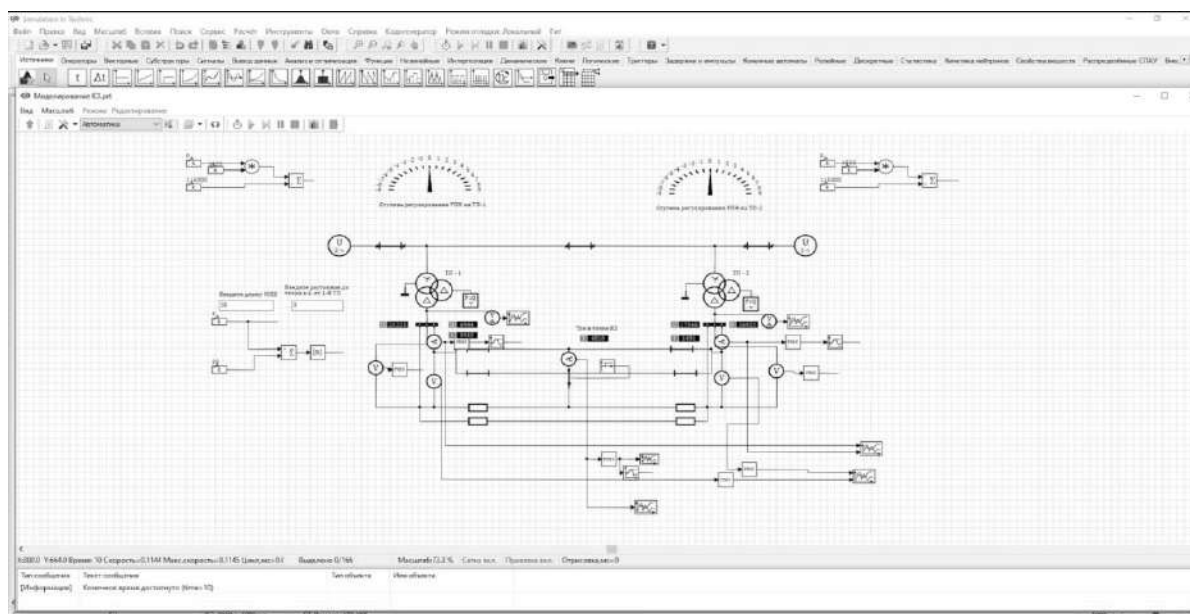
тельность которых значительно больше частоты сети.

ЭЦ-Динамика производит расчеты мгновенных значений токов и напряжений в виде систем дифференциальных уравнений. Данную библиотеку целесообразно применять для исследования переходных процессов, длительность которых меньше частоты сети. Именно эта библиотека применима для моделирования КЗ с шагом интегрирования не более 0,001 с для достаточной точности расчетов.

Была построена модель системы тягового электроснабжения 1×25 кВ, которая позволяет менять различные характеристики: тяговых трансформаторов (ТТ), напряжения линий электрических передач, длины межподстанционной зоны (МПЗ) и задавать ступени регулирования РПН ТТ. Замыкание в модели происходит между контактной сетью и рельсами на различном удалении от подстанций. Фрагмент модели представлен на рис. 1.

### Моделирование устройства регулирования напряжения под нагрузкой

В работе рассмотрен режим КЗ на различных положениях переключателя РПН. Для этого в программу были добавлены два регулятора, имитирующие ступени регулировки устройства РПН. Регуляторы расположены в верхней части



**Рис. 1.** Рабочее окно программы SimInTech и модель короткого замыкания системы тягового электроснабжения  
**Fig. 1.** The working window of the SimInTech program and the short circuit model of the traction power supply system

рабочего пространства модели (рис. 1).

Каждый регулятор математически связан с моделью тягового трансформатора, а именно при изменении ступени регулятора меняется коэффициент трансформации ТТ. Таким образом нулевая ступень регулятора соответствует номинальному значению напряжения ТТ [5, 6].

В тяговых трансформаторах марки ТДТНЖ устройство РПН установлено на обмотке высшего напряжения. Таким образом, при переключении на более высокую ступень происходит изменения числа витков обмотки высокого напряжения.

Данная модель хорошо демонстрирует высокую интерактивность программы SimInTech. Например, позволяет задавать параметры устройствам за счет регуляторов, которые находятся непосредственно на рабочем пространстве модели. При необходимости модель можно значительно усовершенствовать, добавив возникновение дуговых процессов, установить посты секционирования, пункты параллельного соединения и т.д. [7–14].

## Расчеты

Длину МПЗ примем равной 30 км. Точки КЗ будем моделировать с шагом 2 км. Результаты расчетов занесем в таблицу по которой построим графики зависимости тока КЗ от местоположения точки КЗ вдоль контактной сети. Программа позволяет сделать осциллограммы

токов и напряжений, тем самым помогая увидеть протекающие переходные процессы в необходимых нам точках (рис. 2). В нашем случае это фидеры подстанций, шины на стороне обмотке высокого напряжения ТТ (где установлен РПН), шины низшего напряжения и непосредственно место КЗ [15, 16].

Отчетливо виден ударный ток, имеющий максимальную амплитуду и постоянную составляющую, затухающую во времени. Также снята осциллограмма действующего тока в точке КЗ (рис. 2, б).

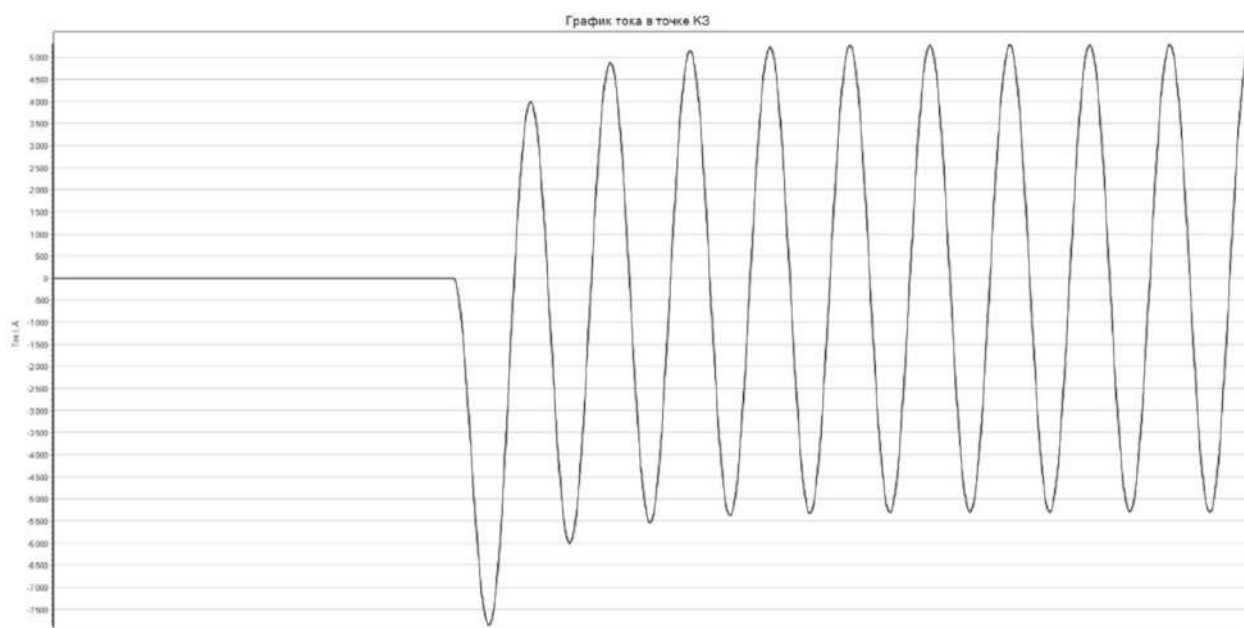
Осциллограммы изменения фазных напряжений на обмотке низшего напряжения в момент КЗ приведены на рис. 3.

Стоит отметить что обмотка 27,5 кВ ТТ собрана по схеме треугольника, из этого следует, что фазные напряжения равны линейным.

Осциллограмма токов на шинах со стороны обмотки высокого напряжения приведена на рис. 4.

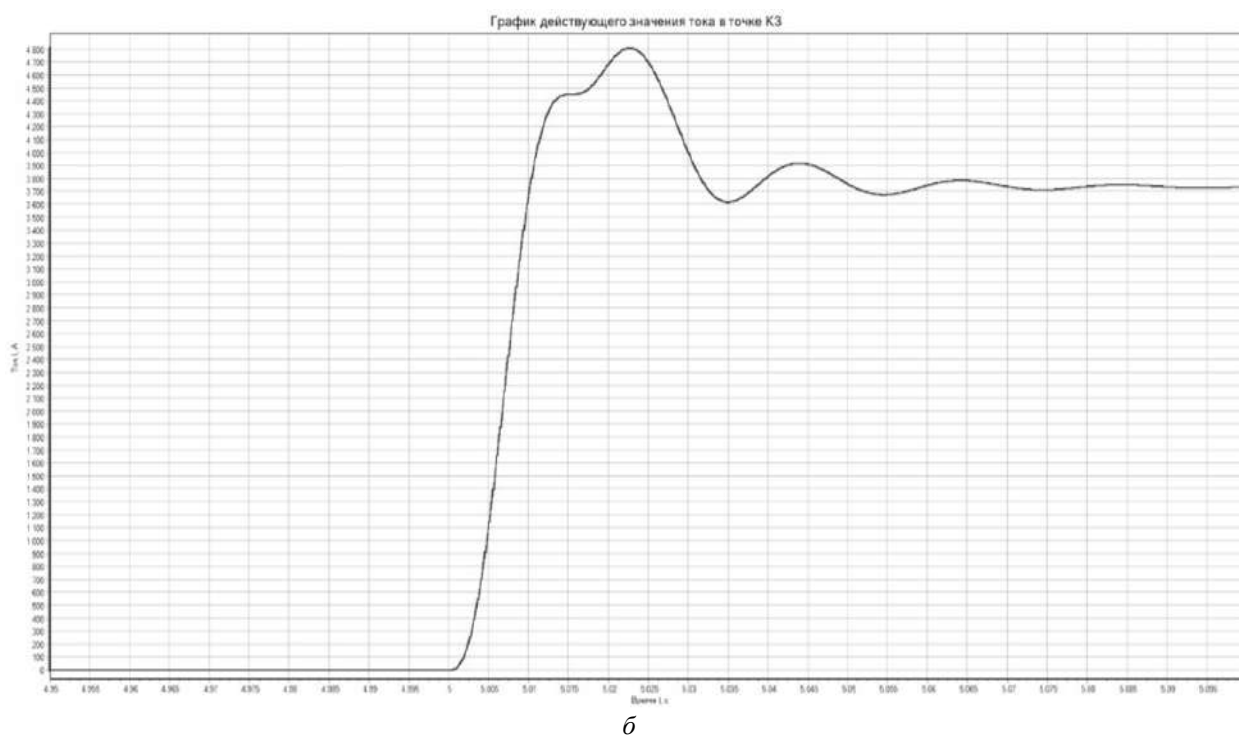
## Результаты расчетов

Для наглядности представления величин протекающих токов в системе тягового электроснабжения при различном удалении от места установки трансформатора до точки КЗ, с учетом разных ступеней регулирования РПН, сведем их в табл., по которой построим график (рис. 5).

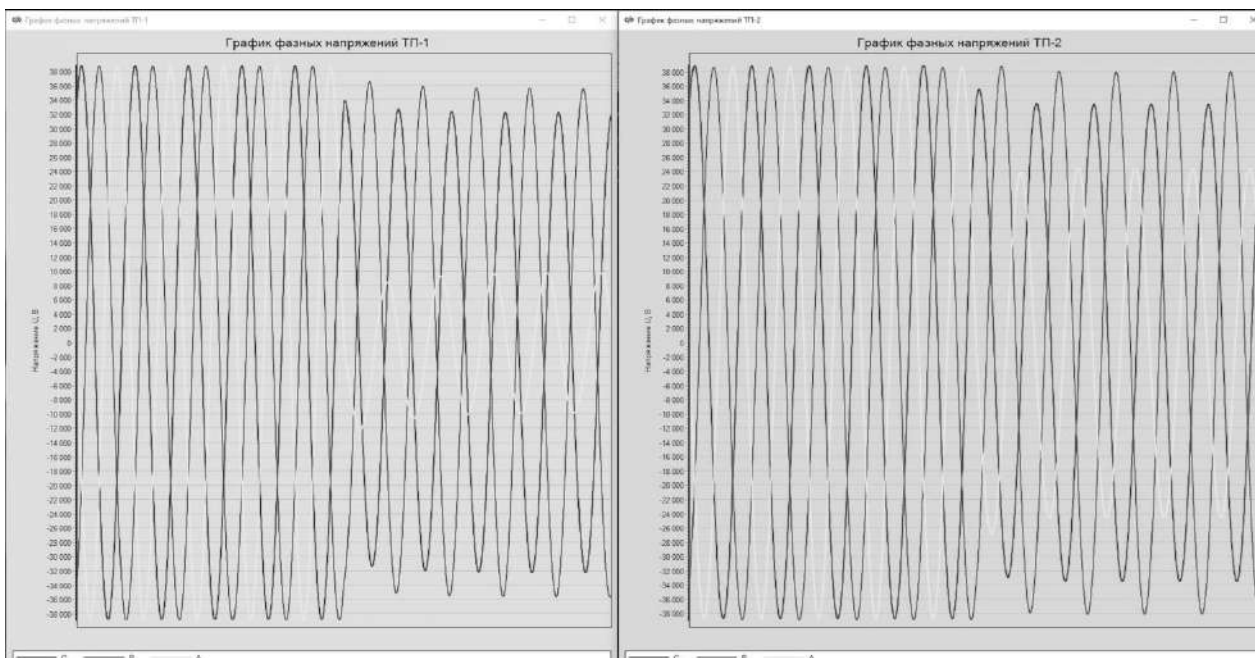


a

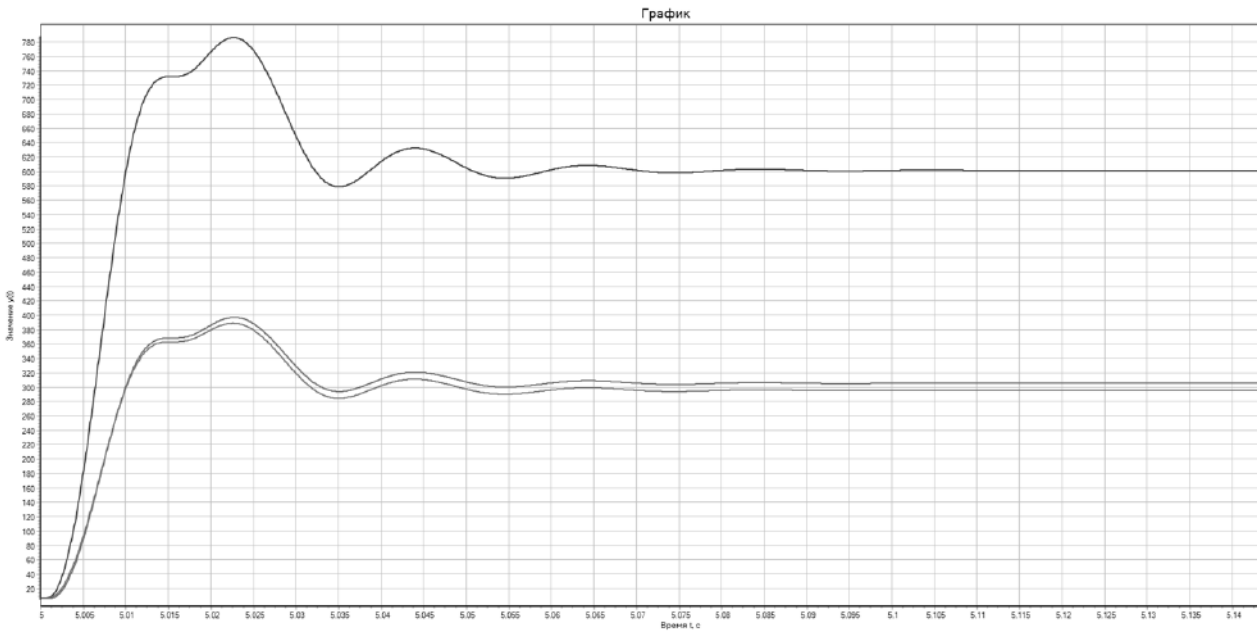




**Рис. 2.** Осциллограммы мгновенного (а) и действующего (б) значений тока в момент короткого замыкания  
**Fig. 2.** Waveforms of the instantaneous (a) and current (b) values at the moment of a short circuit



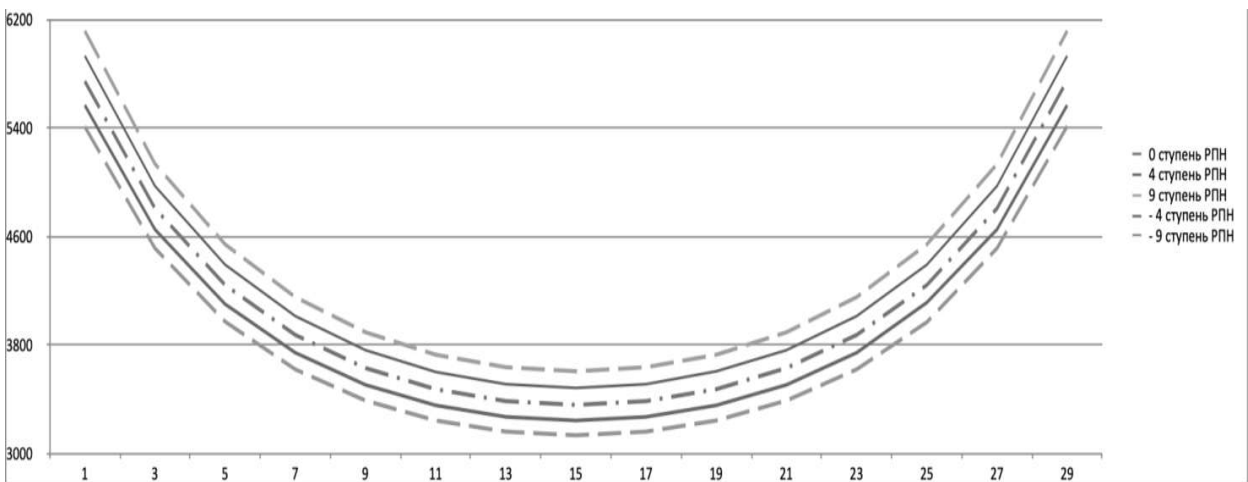
**Рис. 3.** Графики изменения фазных напряжений в момент короткого замыкания на обмотке 27,5 кВ тягового трансформатора  
**Fig. 3.** Graphs of phase voltage changes at the time of short circuit on the 27,5 kV winding of the traction transformer



**Рис. 4.** Осциллограмма токов в момент короткого замыкания на вводах тягового трансформатора  
**Fig. 4.** Oscillogram of currents at the moment of short circuit at the inputs of the traction transformer

Зависимость тока короткого замыкания от расстояния между ТП-1 и местом короткого замыкания  
 Dependence of the short-circuit current on the distance between the traction substation-1 and the short-circuit location

Ступень регулировки напряжения под нагрузкой	Расстояние от ТП-1 до точки короткого замыкания, км														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
0	5 744	4 806	4 241	3 873	3 629	3 473	3 385	3 357	3 385	3 473	3 629	3 873	4 241	4 806	5 750
4	5 931	4 971	4 391	4 012	3 761	3 600	3 510	3 482	3 510	3 605	3 761	4 012	4 391	4 971	5 931
9	6 115	5 135	4 541	4 152	3 893	3 727	3 635	3 605	3 635	3 727	3 893	4 152	4 541	5 132	6 115
-4	5 567	4 651	4 100	3 742	3 505	3 354	3 269	3 242	3 269	3 354	3 505	3 742	4 112	4 651	5 567
-9	5 409	4 512	3 971	3 619	3 389	3 242	3 160	3 133	3 160	3 242	3 389	3 619	3 967	4 512	5 412



**Рис. 5.** Зависимость величины тока от расстояния между точкой короткого замыкания и ТП-1  
**Fig. 5.** The dependence of the short-circuit current on the distance between the TS-1 and the short-circuit location

При увеличении напряжения растет ток КЗ вдоль всей линии контактной сети. Разница между токами КЗ при наибольшей и наименьшей ступенями регулировки составляет порядка 900 А рядом с тяговыми подстанциями и 500 А в середине МПЗ.

Также провели моделирование КЗ при разных уровнях напряжения на тяговых подстанциях. Для этого на ТП-1 задали нулевую ступень регулирования, а на ТП-2 повысили сначала на четвертую, а затем на девятую.

### Заключение

Подводя итог, перечислим основные преимущества программы:

1. SimInTech позволяет моделировать систему тягового электроснабжения и производить расчет токов КЗ с помощью системы дифференциальных уравнений.

2. Полученные расчеты (осциллограммы) при моделировании переходного процесса подтверждают сходимость результатов с классическими закономерностями теории электрических сетей.

3. Пользователь программы может производить гибкую настройку модели, менять характеристики элементов, снимать осциллограммы на различных узлах, визуализировав расчет или вносить изменения непосредственно во время моделирования, тем самым создавая динамические модели.

4. Можно создавать комбинированные системы автоматики в системах электроснабжения, при необходимости добавлять новые элементы управления.

5. Моделирование в SimInTech применимо для сетей как тягового и нетягового, так и внешнего электроснабжения.

Таким образом, SimInTech способна дополнить и значительно расширить функционал в сравнении с уже известными программными комплексами для расчетов систем тягового электроснабжения, например, такими как «КОРТЭС». Ее возможности позволяют комплексно проводить исследования систем электроснабжения (подстанции, контактная сеть, системы автоматики, подвижной состав) [17, 18].

По результатам моделирования также можно сделать вывод, что при возникновении КЗ на стороне обмотки 27,5 кВ не оказывается значительного негативного влияния на РПН, которое установлено в нейтраль обмотки высокого напряжения тягового трансформатора. Как мы видим из осциллограмм на шинах высокого напряжения, токи, возникающие при КЗ, не превышают 1 000 А даже при условии расположения КЗ в непосредственной близости от ТП, что является допустимыми значениями для РПН. Таким образом, КЗ возникающее на стороне низшего напряжения тягового трансформатора не оказывает значительного влияния на ресурс надежности устройства.

Однако от выбранной ступени регулирования РПН зависят токи КЗ в контактной сети. В результате моделирования мы выяснили, что разность между max и min значением может достигать до 1 000 А.

### Список литературы

1. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. М. : МЭИ, 2006. 319 с.
2. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России № 250 от 23.06.2022. Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
3. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения / сост. Ю.И. Жарков, Е.П. Фигурнов, Т.Е. Петрова. М. : Трансиздат, 2005. 216 с.
4. Герман Л.А., Герман В.Л. Диагностика аварийных ситуаций контактной сети переменного тока железных дорог // Электроника и электрооборудование транспорта. 2008. № 3. С. 41–47.
5. Герман Л.А. Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М. : МГУПС, 2014. 173 с.
6. Совершенствовать регулирование напряжения на тяговых подстанциях / Л.А. Герман, Д.А. Куров, С.О. Фельдман и др. // Локомотив. 2012. № 5 (665). С. 45–46.
7. Интеллектуальные терминалы для автоматизации электроснабжения / Л.А. Герман, А.В. Саморуков, Д.В. Ишкин и др. // Локомотив. 2013. № 12 (684). С. 39–40.
8. Худоногов И.А., Галков А.А. Современные подходы к оценке состояния устройств регулирования напряжения под нагрузкой силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций // Образование – Наука – Производство : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита, 2023. Т. 1. С. 316–323.
9. Коноплев Н.Е. Управление устройством РПН трансформатора с помощью алгоритмов нечеткой логики // Наука и молодежь : материалы XX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Барнаул,

2023. Т. 1. Ч. 1. С. 342–344.

10. Турсунов Д.А., Исмоилов И.К. Анализ вопросов применения устройств регулирования силовых трансформаторов // *Universum: технические науки*. 2020. № 8-3 (77). С. 68–75.

11. Герман Л.А., Кишкурно К.В. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог // *Электричество*. 2014. № 9. С. 23–33.

12. Каландаров Х.У., Михеев Г.М., Ефремов Л.Г. Применение переключающих устройств в электроэнергетике // *Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения* : сб. науч. тр. Чебоксары, 2015. Т. 11. С. 129–139.

13. Фельдман С.О., Ячкула Н.И. Автоматическое регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока // *Локомотив*. 2013. № 1 (673). С. 46–47.

14. Переключающие устройства: Основные характеристики и технические данные. EA-740. София : ННИ-В, 2011. 56 с. URL : [http://mail.gercon-ltd.ru/files/PU\\_OB\\_KAT.pdf](http://mail.gercon-ltd.ru/files/PU_OB_KAT.pdf) (Дата обращения 01.04.2024).

15. Пат. 2531025 Рос. Федерация. Устройство контроля короткого замыкания в контактной сети переменного тока двухпутного участка железной дороги / Л.А. Герман, В.Л. Герман, Д.А. Жевлаков и др. № 2012138506/28 ; заявл. 07.09.12 ; опубл. 20.10.14, Бюл. № 29. 8 с.

16. Пат. 2365929 Рос. Федерация. Устройство контроля короткого замыкания в контактной сети / Л.А. Герман, В.Л. Герман. № 2008111210/28 ; заявл. 24.03.2008 ; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. 7 с.

17. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. Смоленск : СФРУК, 2013. 150 с.

18. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The Use of «Technical Rigidity» Indices to Assess Climatic Factors Effects on Power Transformers Reliability // *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Chelyabinsk, 2020. P. 136–141. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216258.

### References

1. 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.

2. Prikaz Mintransa Rossii № 250 ot 23.06.2022 «Ob utverzhdenii 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»].

3. Rukovodyashchie ukazaniya po releinoi zaschite sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Guidelines for relay protection of traction power supply systems]. Compiled by Zarkov Yu.I., Figurnov E.P., Petrova T.E. Moscow: Transizdat Publ., 2005. 216 p.

4. German L.A., German V.L. Diagnostika avariinykh situatsii kontaktnoi seti peremennogo toka zheleznykh dorog [Diagnostics of emergency situations of the AC contact network of railways]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2008, no. 3, pp. 41–47.

5. German L.A., German V.L. Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoi seti peremennogo toka [Automation of power supply of AC traction network]. Moscow: MGUPS Publ., 2014. 173 p.

6. German L.A., Kurov D.A., Fel'dman S.O., Kishkurno K.V. Sovershenstvovat' regulirovanie napryazheniya na tyagovykh podstantsiyakh [Improve voltage regulation at traction substations]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2012, no. 5 (665), pp. 45–46.

7. German L.A., Samorukov A.V., Ishkin D.V., Yakunin D.V. Intel'lectual'nye terminaly dlya avtomatizatsii elektrosnabzheniya [Intelligent terminals for power supply automation]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2013, no. 12 (684), pp. 39–40.

8. Khudonogov I.A., Galkov A.A. Sovremennye podkhody k otsenke sostoyaniya ustroystv regulirovaniya napryazheniya pod nagruzkoy silovykh maslonapolnennykh transformatorov tyagovykh podstantsii [Modern approaches to assessing the condition of voltage regulation devices under load of power oil-filled transformers of traction substations]. *Materialy VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the VII All-Russian scientific and practical conference with international participation «Education – Science – Production»]. Chita, 2023, vol. 1, pp. 316–323.

9. Konoplev N.E. Upravlenie ustroystvom RPN transformatora s pomoshch'yu algoritmov nechetkoi logiki [Transformer on-load tap-changer control using fuzzy logic algorithms]. *Materialy XX Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Nauka i Molodezh»* [Proceedings of the XX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists «Science and Youth»]. Barnaul, 2023, vol. 1, part 1, pp. 342–344.

10. Tursunov D.A., Ismoilov I.K. Analiz voprosov primeneniya ustroystv regulirovaniya silovykh transformatorov [Analysis of issues related to the use of power transformer control devices]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2020, no. 8-3 (77), pp. 68–75.

11. German L.A., Kishkurno K.V. Regulirovanie napryazheniya v tyagovoi seti peremennogo toka zheleznykh dorog [Voltage regulation in the AC traction network of railways]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2014, no. 9, pp. 23–33.

12. Kalandarov, Kh.U., Mikheev G.M., Efremov L.G. Primenenie pereklyuchayushchikh ustroystv v elektroenergetike [Application of switching devices in the electric power industry]. *Sbornik nauchnykh trudov «Regional'naya energetika i elektrotekhnika: problemy i resheniya»* [Proceedings «Regional energy and electrical engineering: problems and solutions»]. Cheboksary, 2015, vol. 11, pp. 129–139.

13. Fel'dman S.O., Yachkula N.I. Avtomaticheskoe regulirovanie napryazheniya v tyagovoi seti peremennogo toka [Automatic voltage regulation in an alternating current traction network]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2013, no. 1 (673), pp. 46–47.

14. Pereklyuchayushchie ustroystva. Osnovnye kharakteristiki i tekhnicheskie dannye EA-740 [Switching devices. Main characteristics and technical data EA-740]. Sofia: HHI-B Publ., 2011. 56 p. Available at: [http://mail.gercon-ltd.ru/files/PU\\_OB\\_KAT.pdf](http://mail.gercon-ltd.ru/files/PU_OB_KAT.pdf) (Accessed April 1, 2024).

15. German L.A., German V.L., Zhevnikov D.A., Popov A.Yu. Patent RU 2531025 C2, 20.10.14.

16. German L.A., German V.L. Patent RU 2365929 C1, 27.08.2009.

17. Uskov A.A. *Sistemy s nechetkimi modelyami ob'ektov upravleniya* [Systems with fuzzy models of control objects]. Smolensk: SFRUK Publ., 2013. 150 p.

18. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The Use of «Technical Rigidity» Indices to Assess Climatic Factors Effects on Power Transformers Reliability. *2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Chelyabinsk, 2020, pp. 136–141. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216258.

#### **Информация об авторах**

*Худоногов Игорь Анатольевич*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: hudonogovi@mail.ru.

*Галков Александр Андреевич*, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: galkov16@gmail.com.

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

*Igor' A. Khudonogov*, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: hudonogovi@mail.ru.

*Alexandr A. Galkov*, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: galkov16@gmail.com.

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**INFORMATION TECHNOLOGY**

## Верификация разработанных математических моделей и созданного программного обеспечения на тестовых моделях пластин и академических рабочих колесах осевых турбомашин

О.В. Репецкий✉, Ван Мань Нгуен

Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация

✉repetckii@igsha.ru

### Резюме

Определение динамических характеристик (собственных частот и форм колебаний) – важная научная задача, позволяющая решать проблему устранения явления резонанса (например, путем изменения формы деталей), а, следовательно, и повышения ресурса деталей турбомашин под действием различных факторов – вращение, температура расстройки параметров и т.д. Сегодня с помощью мощных компьютеров и за счет развития цифровых методов можно значительно сократить время, затрачиваемое на решение подобных задач, а также сэкономить финансовые средства. Однако в процессе разработки математических моделей и численных методов исследования необходимо верифицировать имеющиеся результаты другими методами, например, сравнением с аналитическим решением или экспериментальными данными. В настоящей работе представлены результаты определения и верификации динамических характеристик колебаний, полученных с помощью разработанных математических моделей и программного обеспечения на тестовых моделях пластин и академических рабочих колесах осевых турбомашин. Установлено, что численные расчеты собственных частот колебаний исследуемых конструкций хорошо согласуются с экспериментальными данными авторов и другими исследованиями, а также с аналитическими решениями. Дополнительно изучено изменение связанности колебаний лопаток за счет увеличения толщины диска рабочего колеса. При этом преобразуются как формы колебаний, так и спектр собственных частот колебаний исходной конструкции. Значительное увеличение толщины диска приводит к локализации форм колебаний лопаток как единичных конструкций. Данный вариант является одним из видов введения расстройки параметров и верификации исследования колебаний колес с неидентичными лопатками.

### Ключевые слова

верификация, динамические характеристики, математическая модель, численный расчет, рабочие колеса

### Для цитирования

Репецкий О.В. Верификация разработанных математических моделей и созданного программного обеспечения на тестовых моделях пластин и академических рабочих колесах осевых турбомашин / О.В. Репецкий, Ван Мань Нгуен // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 134–144. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).134-144.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 06.05.2024 г.; поступила после рецензирования: 10.05.2024 г.; принята к публикации: 13.05.2024 г.

### Благодарность

Данная работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 24-29-00135 «Численное исследование способов увеличения ресурсных характеристик осевых и радиальных транспортных турбомашин с помощью преднамеренной расстройки геометрических, массовых, аэродинамических и других параметров влияния». Авторы благодарят Российский научный фонд за поддержку настоящих исследований.

## Verification of the developed mathematical models and the created software on test models of plates and bladed disks of axial turbomachines

O.V. Repetskii✉, Van Man' Nguyen

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevskii, Irkutsk, the Russian Federation

✉repetckii@igsha.ru

### Abstract

Determining the dynamic characteristics of vibrations (natural frequencies and waveforms) is an important task that allows to solve the problem of eliminating the resonance phenomenon, for example, by changing the shape of parts and increasing the life of turbomachine parts under the influence of various factors such as rotation, parameter mistuning, etc. Today, with the advent of powerful computers and the development of digital methods, it is possible to significantly reduce the time and financial means spent on solving such tasks. However, in the process of developing mathematical models and numerical research methods, it is necessary to verify

the results obtained by other methods, for example, an analytical solution or data experiments. This paper presents the results of determining the dynamic characteristics of vibrations of test models of plates and academic impellers of axial turbomachines. It is found that the results of numerical calculations of the structure's natural oscillation frequencies are in good agreement with the authors' experimental data as well as other investigations and analytical data. A change in the coupling of blade vibrations due to an increase in the thickness of the impeller disc has also been investigated. At the same time, the waveforms and the natural frequency spectrum of the vibrations of the original structure change. This option is one of the types of introducing parameter mistuning and verification of the study of bladed disks vibrations with non-identical blades.

### Keywords

verification, dynamic characteristics, mathematical model, numerical calculation, bladed disks

### For citation

Repetskii O.V., Nguyen Van Man'. Verifikatsiya razrabotannykh matematicheskikh modeley i sozdanogo programmnoho obespecheniya na testovykh modelyakh plastin i akademicheskikh rabochikh kolesakh osevykh turbomashi [Verification of the developed mathematical models and the created software on test models of plates and bladed disks of axial turbomachines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 134–144. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).134-144.

### Article info

Received: May 6, 2024; Revised: May 10, 2024; Accepted: May 13, 2024.

### Acknowledgement

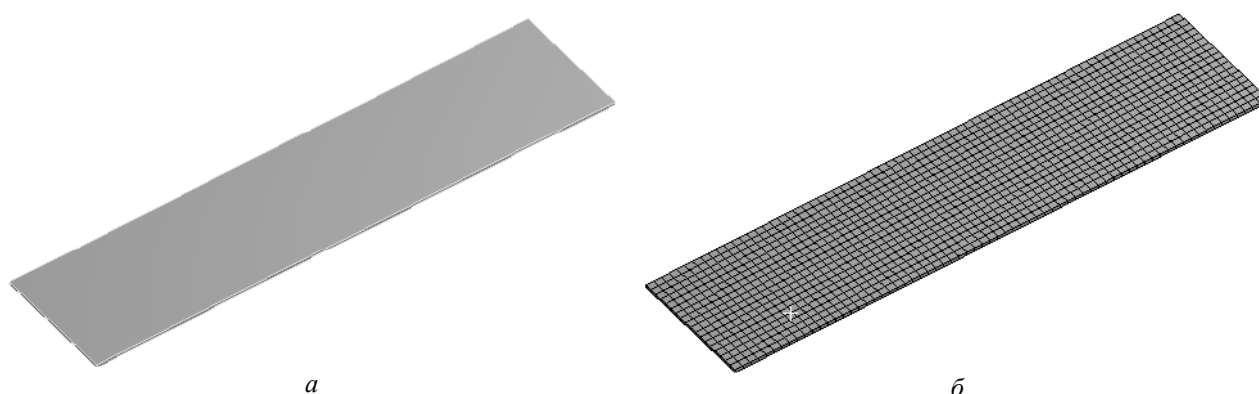
This work was carried out within the framework of the grant of the Russian Scientific Foundation No 24-29-00135 «Numerical study of ways to increase the resource characteristics of axial and radial transport turbomachines by deliberately detuning geometric, mass, aerodynamic and other influence parameters». The authors thank the Russian Science Foundation for supporting these researches.

### Введение

Рабочие лопатки являются наиболее сложной и высоконагруженной частью паровых турбин и в значительной мере определяют надежность работы всего турбоагрегата. Во время работы на них воздействуют различные факторы, в том числе статические, динамические и температурные напряжения. Под действием этих напряжений рабочие лопатки подвергаются вынужденным колебаниям и приводят к накоплению повреждений в лопатке по механизму многоциклового усталости [1, 2]. До 60–70 % поломок лопаток компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) имеют усталостный характер [3].

С точки зрения надежности двигателя необходимо исследовать динамические характеристики колебаний рабочих колес турбомашин.

В этой связи целью данной работы является верификация разработанных математических моделей и созданного программного обеспечения для определения собственных частот и форм колебаний конструкции. Расчеты проведены на тестовых моделях пластин и академических рабочих колесах осевых турбомашин. Полученные результаты хорошо согласуются с аналитическим решением и экспериментальными данными других авторов [4, 5].



**Рис. 1.** Тестовая пластина:  
а – модель 3D; б – конечноэлементная модель

**Fig. 1.** Test plate:  
а – 3D model; б – finite element model



### Верификация численных расчетов динамических характеристик тестовой пластины аналитическим решением

На первом этапе исследования рассмотрена задача колебаний консольной пластины (рис. 1). Основные геометрические и механические характеристики имеют вид: длина пластины – 0,069 м, ширина – 0,0175 м, толщина – 0,004 м, модуль упругости материала –  $2,0 \cdot 10^5$  МПа, плотность –  $7\,850$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона – 0,3 [6]. Расчеты собственных частот колебаний тестовой пластины с учетом вращения верифицированы по аналитическому решению и по численному расчету в Ansys Mechanical на основе метода конечных элементов (МКЭ) [7, 8]. Результаты расчетов показаны в табл. 1. Видно, что программа Ansys Workbench с использованием конечного элемента дает результаты, хорошо согласующиеся с результатами аналитического решения. На рис. 2 показаны первые четыре собственные

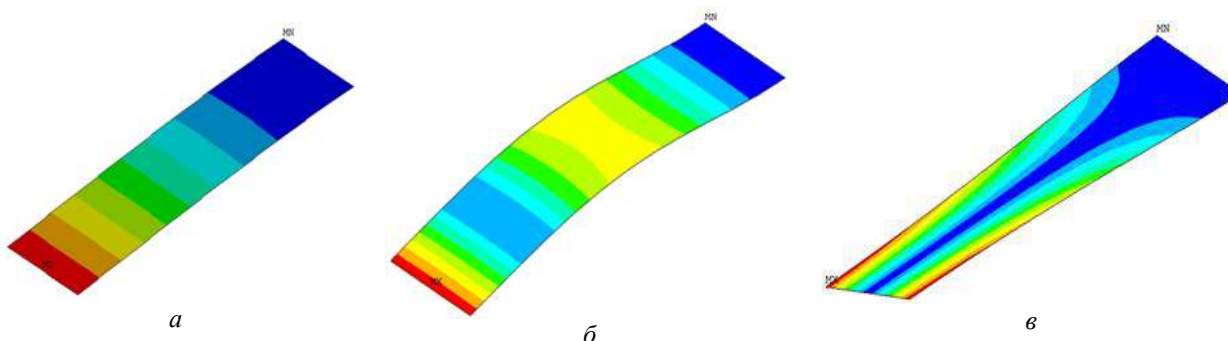
формы колебаний тестовой пластины с разными характеристиками.

### Верификация результатов численного исследования академического рабочего колеса турбомашин с экспериментальными данными

В данном разделе выполнены численно-экспериментальные исследования академического рабочего колеса с десятью лопатками. Основные механические характеристики исследуемого объекта имеют вид: материал рабочего колеса – сталь, модуль Юнга –  $2,1 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>, плотность –  $7\,850$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона – 0,3 [9, 10]. Общий вид академического колеса показан на рис. 3. Конструкция была жестко закреплена вдоль обода диска. Сетка конечного элемента построена в программе Ansys Workbench с использованием конечных элементов ТЕТ10 с тремя степенями свободы. Размер сетки составляет 2 925 элементов и 5 741 узловая точка.

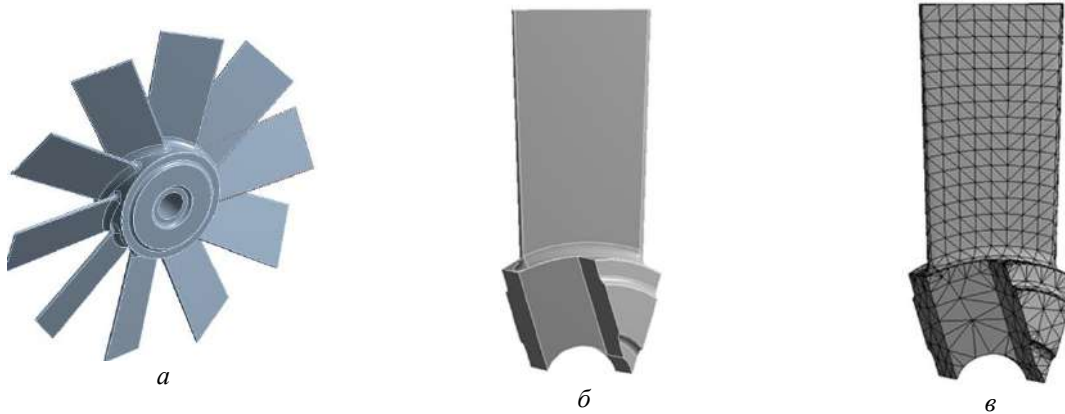
**Таблица 1.** Расчет частот собственных колебаний пластины с учетом вращения  
**Table 1.** Calculation of the natural vibration frequencies of the plate taking into account rotation

Формы колебаний Vibration modes	Угловая частота вращения пластины $\Omega$ , рад/с The angular frequency of rotation of the plate $\Omega$ , rad/s						
	0	500		1 000		1 500	
	$f$ , Гц	$f$ , Гц	$\Delta f$ , %	$f$ , Гц	$\Delta f$ , %	$f$ , Гц	$\Delta f$ , %
Аналитическое решение Analytical solution							
1	715	735	2,8	792	10,8	879	22,9
3	4 784	4 787	0,1	4 796	0,25	4 811	0,57
4	5 612	5 614	0,05	5 622	0,18	5 635	0,42
Метод конечных элементов The finite element method							
1	715	736	2,9	797	11,5	889	24,4
3	4 784	4 806	0,4	4 870	1,8	4 976	4,0
4	5 612	5 617	0,08	5 615	0,05	5 631	0,34



**Рис. 2.** Основные формы колебаний тестовой пластины:  
*a* – форма 1; *б* – форма 3; *в* – форма 4

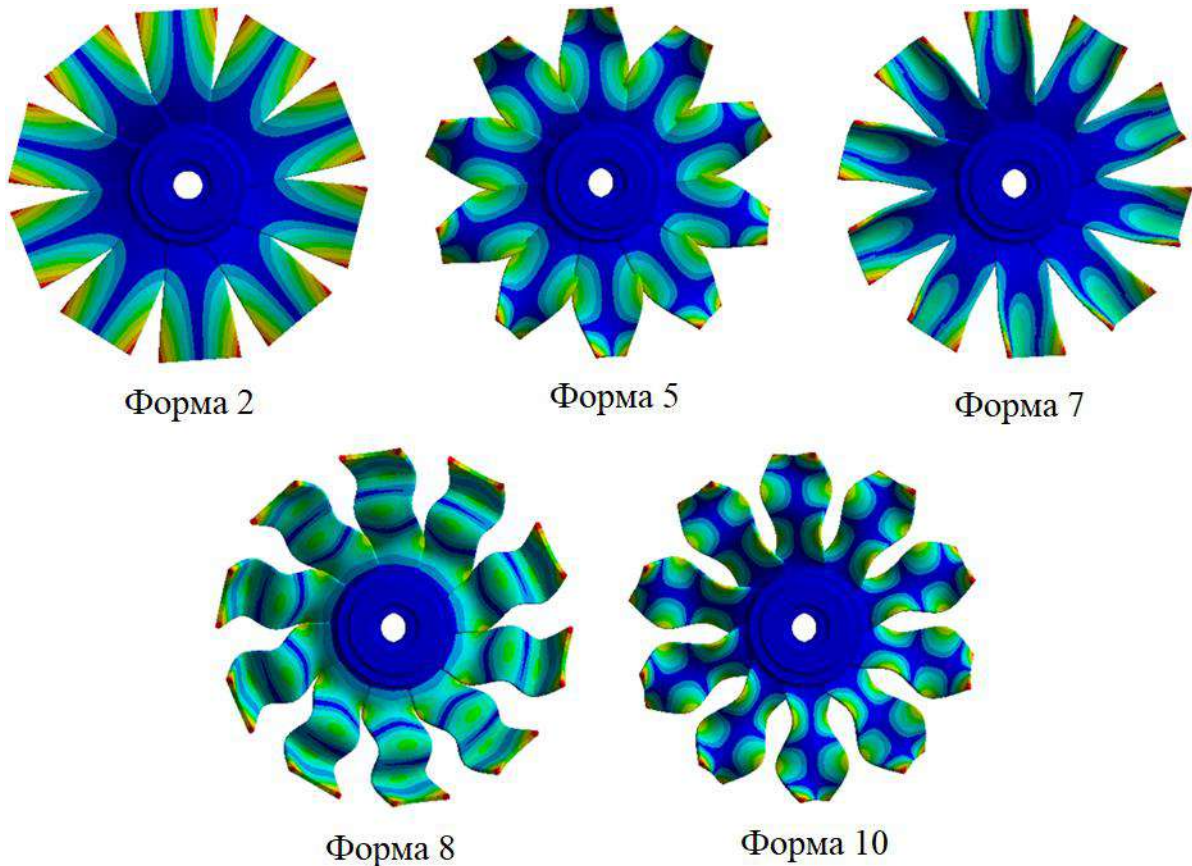
**Fig. 2.** Basic vibration modes of the test plate:  
*a* – Mode No 1; *b* – Mode No 3; *c* – Mode No 4



**Рис. 3.** Академическое рабочее колесо с десятью лопатками:  
*a* – общий вид; *б* – вид одного сектора; *в* – конечноэлементная модель сектора  
**Fig. 3.** Academic impeller with ten blades  
*a* – general view; *b* – view of one sector; *c* – finite element model of the sector)

Колебательные процессы лопаток определяют динамические свойства рабочего колеса, в том числе собственную частоту и форму колебаний. Таким образом, исследование собственных частот и форм колебаний лопаток является важной задачей при проектировании

турбомашин. На рис. 4 показаны некоторые виды форм колебаний полного академического рабочего колеса с различными номерами узловых диаметров и узловых окружностей. В табл. 2 приведены значения частот собственных колебаний одного сектора модельного колеса.



**Рис. 4.** Формы колебаний академического рабочего колеса  
**Fig. 4.** Vibration modes of the academic impeller (modes 2, 5, 7, 8, 10)

Для проведения эксперимента используется система измерения с лазерным сканирующим виброметром для анализа возбуждения колебаний облопаченного диска (рис. 5) [11–13]. Система экспериментальной установки состоит из диска с лопатками, устройства управления, лазерного виброметра, модально-го молотка, дополнительной массы и подушки из пены.

В табл. 3 показан численно-экспериментальный результат анализа частот собственных колебаний рабочего колеса для различных форм колебаний. Видно, что результаты численных расчетов очень мало отличаются от экспериментальных данных (менее 2%), что подтверждает адекватность разработанных математических моделей и авторских программ.

**Таблица 2.** Расчет частот собственных колебаний одного сектора модельного колеса  
**Table 2.** Calculation of natural oscillation frequencies of one sector of the model wheel

Форма колебаний Vibration modes	Частота $f$ , Гц Frequency $f$ , Hz		
	ABAQUS	ANSYS	Эксперимент Experiment
1	264,49	260,57	–
2	923,46	905,4	919,69
3	1 361,5	1 342,1	–
4	1 958,0	1 937,3	–
5	2 857,1	2 748,0	2 752,50
6	3 745,7	3 689,0	–
7	4 957,6	4 510,5	4 489,84
8	5 422,9	4 915,2	5 319,30
9	5 628,6	5 348,2	–
10	7 204,2	7 036,2	6 914,84



**Рис. 5.** Экспериментальное исследование динамических характеристик колебаний академического колеса

**Fig. 5.** Experimental study on the dynamic characteristics of the academic disk vibration

**Таблица 3.** Численно-экспериментальный результат анализа частот колебаний рабочего колеса, Гц  
**Table 3.** Numerical and experimental result of the analysis of the vibration frequencies of the impeller, Hz

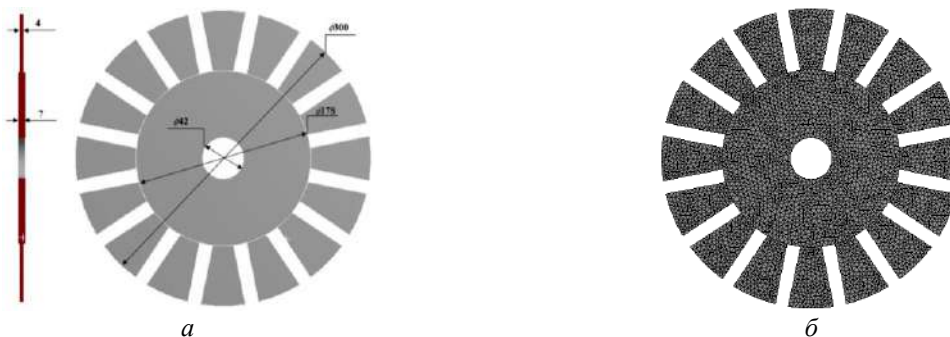
Номер лопатки Blade number	Форма 2 Mode shape 2		Форма 5 Mode shape 5		Форма 7 Mode shape 7		Форма 8 Mode shape 8		Форма 10 Mode shape 10	
	Метод конечных элементов Final element method	Эксперимент Experiment	Метод конечных элементов Final element method	Эксперимент Experiment	Метод конечных элементов Final element method	Эксперимент Experiment	Метод конечных элементов Final element method	Эксперимент Experiment	Метод конечных элементов Final element method	Эксперимент Experiment
1	905,4	919,69	2 748,0	2 752,50	4 510,5	4 489,84	4 915,2	5 319,30	7 036,2	6 914,84
2	905,5	920,08	2 748,0	2 756,72	4 510,5	4 498,98	4 915,3	5 324,61	7 038,2	6 923,83
3	905,7	921,48	2 748,1	2 757,34	4 510,6	4 501,02	4 915,4	5 328,91	7 039,4	6 930,23
4	906,1	920,08	2 748,2	2 753,98	4 510,6	4 491,88	4 915,4	5 322,27	7 043,7	6 918,83
5	906,1	920,63	2 749,0	2 757,50	4 512,0	4 499,84	4 918,2	5 327,11	7 043,9	6 924,22
6	906,2	921,33	2 749,3	2 756,41	4 512,1	4 494,30	4 918,7	5 326,48	7 044,2	6 924,38
7	906,4	922,58	2 749,4	2 758,44	4 512,5	4 502,50	4 919,8	5 329,69	7 048,2	6 934,53
8	907,2	922,03	2 749,2	2 758,52	4 514,5	4 500,55	4 919,9	5 330,00	7 049,2	6 927,11
9	907,4	922,34	2 750,0	2 759,14	4 514,7	4 503,98	4 920,2	5 332,97	7 049,4	6 933,91
10	907,5	921,17	2 750,5	2 757,27	4 515,2	4 497,57	4 920,4	5 328,35	7 049,6	6 925,03

### Исследование влияния связанности колебаний на динамические характеристики колебаний рабочего колеса

На данном этапе изучается процесс искажения собственных форм рабочих колес с нарушением симметрии вращения при уменьшении связи колебаний лопаток (за счет увеличения толщины диска) вплоть до ее полного исчезновения. В качестве объекта исследования рассмотрено модельное рабочее колесо с 16 лопатками. Рабочее колесо изготовлено из нержавеющей стали с модулем Юнга –  $1,93 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>, плотностью – 8 000 кг/м<sup>3</sup>, коэффициентом Пуассона – 0,29 [14–16]. Общий вид рабочего колеса представлен на рис. 6, а. Диаметр колеса – 300

мм, толщина диска – 7 мм, толщина лопаток – 4 мм. На рис. 6, б показана сетка конечных элементов, построенная на базе Ansys Workbench с количеством трехмерных элементов 46 001.

При изучении характеристик свободных колебаний колеса предполагается, что колесо имеет неподвижную опору в центре. На рис. 7 показан спектр собственных частот колебаний модельного колеса для форм без узловых окружностей, где  $m$  – количество узловых диаметров. Синими треугольниками отмечены численные результаты на Ansys Workbench, а красная линия показывает экспериментальные результаты, проведенные авторами работы [14]. Из представленных данных видно, что численные итоговые значения, полученные с исполь-



**Рис. 6.** Рабочее колесо компрессора с 16 лопатками:  
 а – общий вид; б – конечноэлементная модель

**Fig. 6.** Compressor impeller with 16 blades:  
 а – general view; б – finite element model

зованием предложенного конечного элемента, дают результаты, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В табл. 4 приведены парциальные частоты лопаток при колебаниях по первой изгибной форме. Для этого случая принимается условие жесткой заделки диска по всей площади как фиксированной поддержки. Результат численных расчетов показывает, что собственные частоты колебаний почти одинаковые для всех лопаток, т.е. при жесткой заделке диска по всей площади каждая лопатка колеблется независимо друг от друга. При экспериментальных исследованиях собственные частоты колебаний лопаток немного отличаются, так как в реальности всегда существует отклонение в процессе изготовления лопаток.

Для исследования изменения связанности колебаний лопаток в модельном колесе увеличивается толщина диска [17–20]. Процессы искажения собственных форм модельного колеса показаны на рис. 8 и 9, где  $N$  – номер лопаток, а

$q_z$  – нормированное размещение на их периферии точечных масс. Линия 1, имеющая вид периодической симметричной функции, указывает на начальную форму колебаний. Линии 2, 3 и 4 указывают различные стадии искажения формы колебаний рабочего колеса при увеличении толщины диска до возникновения полной локализации.

При увеличении толщины диска изменяется не только форма, но и частоты колебаний исходной конструкции. В табл. 5 приведен спектр собственных частот колебаний исходной конструкции для форм без узлов окружностей. При толщине диска 7 мм, собственные частоты колебаний исходной конструкции возрастают с увеличением номера узловых диаметров. При толщине диска намного больше размера лопаток ( $h = 140$  мм) собственные частоты колебаний конструкции можно считать одинаковыми для всех номеров узловых диаметров, т.е. связанность колебаний лопаток почти исчезает (табл. 6).

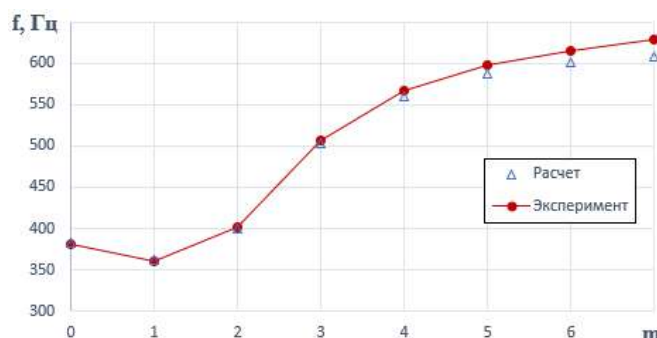


Рис. 7. Спектр собственных частот колебаний исследуемой конструкции  
Fig. 7. The spectrum of natural oscillation frequencies of the studied structure

Таблица 4. Парциальные собственные частоты колебаний лопаток модельного рабочего колеса  
Table 4. Partial natural oscillation frequencies of the model impellers blades

Номер лопатки Blade number	$f$ , Гц (расчет) $f$ , Hz (calculation)	$f$ , Гц (эксперимент) $f$ , Hz (experiment)
1	680,39	675
2	680,7	670
3	680,74	684
4	680,81	663
5	680,84	676
6	680,88	688
7	680,93	687
8	680,93	684
9	681,12	684
10	681,2	675
11	681,35	670
12	681,64	679
13	681,67	686
14	681,7	687
15	681,94	684
16	682,05	673

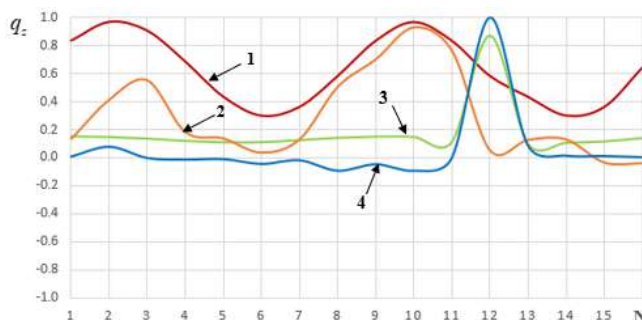


Рис. 8. Изменение формы колебаний с  $m = 0$  при утолщении диска  $h$  модельного рабочего колеса:  
 1 – 7 мм; 2 – 14 мм; 3 – 70 мм; 4 – 140 мм

Fig. 8. Variation of the vibration mode from  $m = 0$  with thickening of the disk  $h$  of the model bladed impeller:  
 1 – 7 mm; 2 – 14 mm; 3 – 70 mm; 4 – 140 mm

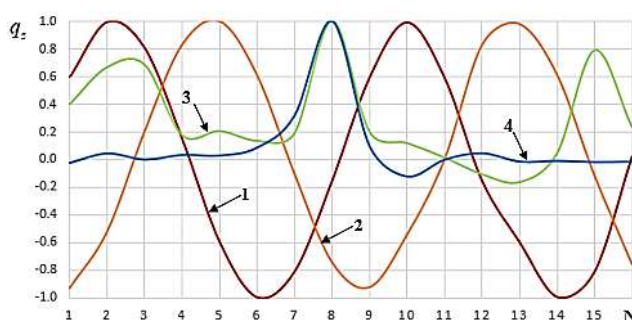


Рис. 9. Изменение формы колебаний с  $m = 2$  при утолщении диска  $h$  модельного рабочего колеса:  
 1 – 7 мм; 2 – 14 мм; 3 – 70 мм; 4 – 140 мм

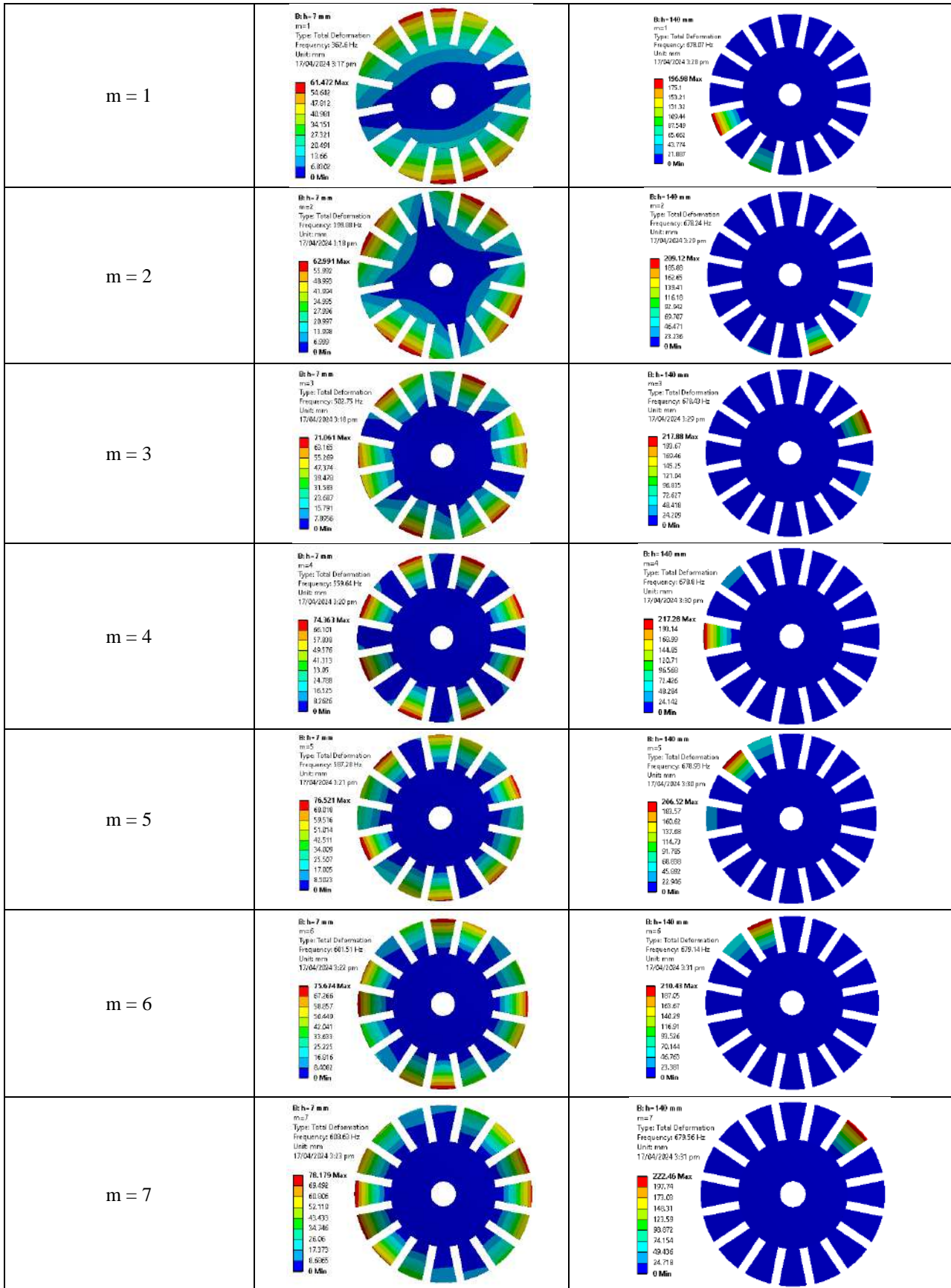
Fig. 9. Variation of the vibration mode from  $m = 2$  with thickening of the disk  $h$  of the model bladed impeller:  
 1 – 7 mm; 2 – 14 mm; 3 – 70 mm; 4 – 140 mm

Таблица 5. Изменение спектра собственных частот колебаний конструкции  
 Table 5. Changing the spectrum of vibrations natural frequencies of the structure

Номер узловых диаметров Number of nodal diameters	$f$ , Гц			
	$h = 7$ мм	$h = 14$ мм	$h = 70$ мм	$h = 140$ мм
$m = 0$	382,28	600,9	677,1	678,07
$m = 1$	362,6	588,47	676,73	678,01
$m = 2$	399,88	604,01	677,22	678,24
$m = 3$	502,75	636,62	677,51	678,43
$m = 4$	559,64	648,54	677,77	678,8
$m = 5$	587,28	653,66	678,12	678,93
$m = 6$	601,51	656,06	678,34	679,14
$m = 7$	608,63	657,36	678,52	679,56

Таблица 6. Формы колебаний модельного рабочего колеса при варьировании толщины диска (от 7 до 140 мм)  
 Table 6. The oscillation patterns of the model bladed impeller when varying the thickness of the disc (from 7 to 140 mm)

Номер узловых диаметров Number of nodal diameters	$h = 7$ мм	$h = 140$ мм
$m = 0$	<p>h = 7 mm                      Type: Total Deformation                      Frequency: 382.28 Hz                      Unit: mm                      15784.02343316 ppm</p>	<p>h = 140 mm                      Type: Total Deformation                      Frequency: 678.01 Hz                      Unit: mm                      17466.0243328 ppm</p>



## Заключение

Проведенные исследования и верификация результатов позволяют сделать заключение, что возможно с высокой точностью использовать численное решение в Ansys Workbench на основе МКЭ для определения динамических характеристик колебаний деталей турбомашин. Проведенный расчет на тестовой пластине показывает результаты, хорошо согласующиеся с данными аналитического решения. Также представлены итоги исследования и верификации на двух конструкциях академических рабочих колес. Полученные спектры собственных частот колебаний конструкций с различными формами колебаний совпадают с экспериментальными данными. В последней части исследования представлено

изменение формы и спектра собственных частот колебаний модельного рабочего колеса с 16-ю лопатками при увеличении толщины диска. При утолщении диска фиксируется искажение собственных форм от нарушения окружного гармонического характера распределения смещений до возникновения полной локализации форм на рабочих лопатках при значительном увеличении амплитуды колебаний.

Результаты данного численного исследования могут быть использованы в процессе анализа прочностных характеристик лопаток компрессоров и турбин на этапе проектирования и доводки новых конструкций для увеличения ресурса реальных рабочих колес турбомашин или продления их ресурса на стадии эксплуатации.

## Список литературы

1. Паровые и газовые турбины для электростанций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин и др. М. : МЭИ, 2016. 557 с.
2. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин. М. : МЭИ, 2007. 476 с.
3. Экспериментальное исследование модели автоклава для гидротермального синтеза минералов / Д.А. Еловенко, П.Г. Пимштейн, О.В. Репецкий и др. // Вестн. Байкальского союза стипендиатов DAAD. 2010. № 1. С. 11–19.
4. Hoffmann T., Scheidt L., Wallaschek J. Single Nodal Diameter Excitation of Turbine Blades: Experimental and Theoretical Study // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2021, Vol. 143, Iss. 9. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4051172>.
5. Иванов В.П. Колебания рабочих колес турбомашин. М. : Машиностроение, 1983. 224 с.
6. Репецкий О.В., Нгуен В.В. Анализ динамических характеристик элементов турбомашин // Вестник НГИЭИ. 2020. № 2 (105). С. 517.
7. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя. М. : ДМК, 2005. 639 с.
8. Modal Analyses of an Axial Turbine Blisk with Intentional Mistuning / B. Beirow, F. Figaschewsky, A. Kühhorn et al. // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2018. Vol. 140, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4037588>.
9. Ewins D.J. Vibration modes of Mistuned bladed disks // Journal of Engineering for Power. 1976. Vol. 98, Iss. 3. P. 349–355.
10. До Мань Тунг. Численный анализ влияния расстройки параметров на динамические характеристики рабочих колес турбомашин : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2014. 197 с.
11. Repetckii O., Nguyen T.Q., Ryzhikov I. Investigation of vibration and fatigue life of mistuned bladed disks // Actual Issues of Mechanical Engineering : proceedings of the International Conference (AIME 2017). Tomsk, 2017. Vol. 133. P. 702707.
12. Repetskiy O.V., Ryzikov I.N. Modeling and simulation of dynamic processes with the help of program package BLADIS+ // International Conference on Systems, Computing Sciences And Software Engineering. Bridgeport, 2007. P. 219–220.
13. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М. : Наука. 1966. 636 с.
14. Ермаков А.И., Урлапкин А.В., Федорченко Д.Г. Влияние связанности колебаний на собственные формы рабочего колеса с неидентичными лопатками // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2014. № 5-3 (47). С. 76–81.
15. Гладкий И.Л., Пивоварова М.В. Разработка способа обрыва рабочей лопатки компрессора высокого давления на заданной частоте вращения // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. 2023. № 3. С. 53–62.
16. Ермаков А.И., Урлапкин А.В., Федорченко Д.Г. Формирование разброса резонансных напряжений в рабочих колесах с неидентичными лопатками и слабой связанностью колебаний // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2014. № 5-4 (47). С. 9–13.
17. Жужукин А.И., Непеин К.Г. Применение спекл-интерферометрии для экспериментального исследования колебаний рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров // Динамика и виброакустика. 2023. Т. 9. № 1. С. 21–32.
18. Рыжиков И.Н., Нгуен Т.К. Влияние расстройки параметров на частоты и формы колебаний конструкций с поворотной симметрией // Механика XXI века. 2015. №14. С. 29–33.
19. Numerical methods for calculating component modes for geometric mistuning reduced-order models / J.A. Beck, J.M. Brown, A.A. Kaszynski et al. // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2022. Vol. 144, Iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4052427>.
20. The dynamic influence of crystal orientation on a second generation single crystal material for turbine buckets / M. Manetti, I. Giovannetti, N. Pieroni et al. // Proceedings of the 2009 ASME Turbo Expo. Orlando, 2009. Vol. 6. Part A. P. 125–135.

## References

1. Kostyuk A.G., Frolov V.V., Bulkin A.Y., Trukhnii A.D. Parovye i gazovye turbiny dlya elektrostantsii [Steam and gas turbines for power plants]. Moscow: MEI Publ., 2016, 557 p.
2. Kostyuk A.G. Dinamika i prochnost' turbomashin [Dynamics and durability of turbomachines]. Moscow: MEI Publ., 2007. 476 p.



3. Elovenko D.A., Pimshtein P.G., Repetskii O.V., Tatarinov D.V. Eksperimental'noe issledovanie modeli avtoklava dlya gidrotermal'nogo sinteza mineralov [Experimental study of the autoclave model for hydrothermal synthesis of minerals]. *Vestnik Baykal'skogo soyuzu stipendiatov DAAD* [Bulletin of the Baikal Union of DAAD], 2010, no. 1, pp. 11–19.
4. Hoffmann T., Scheidt L., Wallaschek J. Single Nodal Diameter Excitation of Turbine Blades: Experimental and Theoretical Study. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, vol. 143, iss. 9. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4051172>.
5. Ivanov V.P. Kolebaniya rabochikh koles turbomashin [Vibrations of turbomachinery impellers]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 224 p.
6. Repetskii O.V., Nguyen V.V. Analiz dinamicheskikh kharakteristik elementov turbomashin [Analysis of the dynamic characteristics of turbomachine elements]. *Vestnik NGIEI* [Bulletin of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics], 2020, no. 2 (105), pp. 5–17.
7. Basov K.A. ANSYS: spravochnik pol'zovatelya [ANSYS: user manual]. Moscow: DMK Publ., 2005. 639 p.
8. Beirow B., Figaschewsky F., Kühhorn A., Bornhorn A. Modal Analyzes of an Axial Turbine Blisk with Intentional Mistuning. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018, vol. 140, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4037588>.
9. Ewins D.J. Vibration modes of Mistuned bladed disks. *Journal of Engineering for Power*, 1976, vol. 98, iss. 3, pp. 349–355.
10. Do Manh Tung. Chislennyi analiz vliyaniya rasstroiki parametrov na dinamicheskie kharakteristiki rabochikh koles turbomashin [Numerical analysis of the influence of parameter detuning on the dynamic characteristics of turbomachinery impellers]. Ph.D.'s thesis. Irkutsk, 2014. 197p.
11. Repetckii O., Nguyen T.Q., Ryzhikov I. Investigation of vibration and fatigue life of mistuned bladed disks. *Proceedings of the International Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering» 2017 (AIME 2017)*. Tomsk, 2017, vol. 133, pp. 702–707.
12. Repetskiy O.V., Ryjikov I.N. Modeling and simulation of dynamic processes with the help of program package BLADIS+. *2007 International Conference on Systems, Computing Sciences And Software Engineering*. Bridgeport, 2007, pp. 219–220.
13. Timoshenko S.P., Woinowsky-Krieger S. Plastinki i obolochki [Theory of Plates and Shells]. Moscow: Nauka Publ., 1966. 636 p.
14. Ermakov A.I., Uralpkin A.V., Fedorchenko D.G. Vliyanie svyazannosti kolebaniy na sobstvennye formy rabocheho koleasa s neidentichnymi lopatkami [The influence of vibration coupling on the proper shapes of an impeller with non-identical blades]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of the Samara State Aerospace University], 2014, no. 5-3 (47), pp. 76–81.
15. Gladkii I.L., Pivovarova M.V. Razrabotka sposoba obryva rabochei lopatki kompressora vysokogo davleniya na zadannoi chastote vrashcheniya [Development of a method for breaking the working blade of a high-pressure compressor at a given rotation speed]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2023, no. 3, pp. 53–62.
16. Ermakov A.I., Uralpkin A.V., Fedorchenko D.G. Formirovaniye razbrosa rezonansnykh napryazhenii v rabochikh kolesakh s neidentichnymi lopatkami i slaboi svyazannost'yu kolebaniy [Formation of dispersion of resonant stresses in impellers with non-identical blades and weak vibration coupling]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of the Samara State Aerospace University], 2014, no. 5-4 (47), pp. 9–13.
17. Zhuzhukin A.I., Nepein K.G. Primenenie spekl-interferometrii dlya eksperimental'nogo issledovaniya kolebaniy rabochikh koles turbomashin s rasstroikoi parametrov [Application of speckle interferometry for experimental study of vibrations of turbomachinery impellers with parameter mistuning]. *Dinamika i vibroakustika* [Dynamics and Vibroacoustics], 2023, vol. 9, no. 1, pp. 21–32.
18. Ryzhikov I.N., Nguyen T.K. Vliyanie rasstroiki parametrov na chastoty i formy kolebaniy konstruksii s povorotnoi simmetriei [The influence of parameter detuning on the frequencies and vibration modes of structures with rotational symmetry]. *Mekhaniki XXI veku* [Mechanics for the XXI century], 2015, no. 14, pp. 29–33.
19. Beck J.A., Brown J.M., Kaszynski A.A., Gillaugh L.D. Numerical methods for calculating component modes for geometric mistuning reduced-order models. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2022, vol. 144, iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4052427>.
20. Manetti M., Giovannetti I., Pieroni N., Horculescu H., Peano G., Zonfrillo G., Giannozzi M. The dynamic influence of crystal orientation on a second generation single crystal material for turbine buckets. *Proceedings of the 2009 ASME Turbo Expo*. Orlando, 2009, vol. 6, part A, pp. 125–135.

### Информация об авторах

**Репецкий Олег Владимирович**, доктор технических наук, профессор, проректор по международным связям, Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск; e-mail: [repetckii@igsha.ru](mailto:repetckii@igsha.ru).  
**Нгуен Ван Мань**, аспирант кафедры электрооборудования и физики, Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск; e-mail: [manhzhucov@gmail.com](mailto:manhzhucov@gmail.com).

### Information about the authors

**Oleg V. Repetskii**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vice-rector for International Relations, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevskii, Irkutsk; e-mail: [repetckii@igsha.ru](mailto:repetckii@igsha.ru).  
**Van Man' Nguyen**, Ph.D. Student of the Department of Power and Physics, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevskii, Irkutsk; e-mail: [manhzhucov@gmail.com](mailto:manhzhucov@gmail.com).

## Обобщенное прогнозирование оборота вагона по комплексной модели, учитывающей статистическую и экспертную информацию

Ю.М. Краковский✉, Г.Н. Крамынина

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

✉yuri.krakovskiy@yandex.ru

### Резюме

В статье предложена и апробирована технология обобщенного прогнозирования оборота вагона с использованием статистической и экспертной информации с учетом сценарного подхода. Оборота вагона – это один из важных показателей для оценки эффективности перевозочного процесса, так как при его сокращении увеличивается объем перевозки грузов. Этот показатель оценивает среднее время в сутках по использованию вагона от погрузки до следующей погрузки. Обобщенное прогнозирование основано на трех значениях оборота вагона с различными весами: а) значение, полученное по трехфакторной модели, зависящей от значимых факторов (значимыми факторами являются грузооборот, производительность вагона, участковая скорость); б) значение, полученное по трендовой модели; в) точечное экспертное суждение. Весовые коэффициенты получены с помощью метода анализа иерархий, использующего экспертные суждения. Дополнительно введены три критерия, что повысило точность весовых коэффициентов. Для этого экспертами-практиками и авторами статьи созданы четыре матрицы суждений. Для каждой матрицы получены значения отношения согласованности, а это позволило убедиться в непротиворечивости суждений созданных матриц. В результате обработки матриц получены итоговые весовые коэффициенты для комплексного критерия. Авторами предложены три сценария развития перевозочного процесса для обобщенного прогнозирования оборота вагона. Для его реализации потребовалось создать 12 трендовых моделей. Показана хорошая практическая точность этого прогнозирования по всем трем предложенным сценариям, хотя сами модели прогнозирования дают заметную погрешность. Из трех рассмотренных сценариев наиболее близкое значение показал третий сценарий. Итоговое прогнозируемое значение равно 7,01 сут., а фактическое – 6,61 сут. Относительная погрешность равна 6,0 %. Тем самым показано, что и в условиях неопределенности перевозочного процесса обобщенное прогнозирование, основанное на комплексном критерии, дает хорошие практические результаты.

### Ключевые слова

оборот вагона, грузооборот, прогнозирование, трендовые модели, экспертные оценки, метод анализа иерархий

### Для цитирования

Краковский Ю.М. Обобщенное прогнозирование оборота вагона по комплексной модели, учитывающей статистическую и экспертную информацию / Ю.М. Краковский, Г.Н. Крамынина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 145–153. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).145-153.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 02.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 09.04.2024 г.; принята к публикации 10.04.2024 г.

## Generalized forecasting of wagon turnover using a complex model that takes into account statistical and expert information

Yu.M. Krakovskii✉, G.N. Kramynina

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

✉yuri.krakovskiy@yandex.ru

### Abstract

A technology for generalized forecasting of wagon turnover using statistical and expert information taking into account the scenario approach has been proposed and tested. Wagon turnover is one of the important indicators for assessing the efficiency of the transportation process, since when it is reduced, the volume of cargo transportation increases. This indicator estimates the average time per day for using a wagon from loading to the next loading. Generalized forecasting is based on three values of wagon turnover with different weights: a) the value obtained from a three-factor model, depending on significant factors, significant factors being freight turnover, wagon productivity, sectional speed; b) the value obtained from the trend model; c) point expert judgment. The weighting coefficients were obtained by means of the hierarchy analysis method using expert judgment. Additionally, three criteria were introduced, which increased the accuracy of the weighting coefficients. As a result, expert practitioners and the authors of the article created four judgment matrices. For each matrix, the values of the consistency relations were obtained, and this made it possible to verify the consistency of the judgments of the created matrices. After processing the matrices, the final weighting coefficients for the complex criterion were obtained. The authors proposed three scenarios for the development of the transportation process for a general forecast of wagon turnover. To implement it, it was necessary to create 12

trend models. Good practical accuracy of this forecasting is shown for all three proposed scenarios, although the forecasting models themselves provide a significant error. Of the three scenarios considered, scenario 3 showed the closest value. The final forecast value is 7,01 days, and the actual value is 6,61 days. The relative error is 6,0%. This shows that even under conditions of uncertainty in the transportation process, generalized forecasting based on a complex criterion gives good practical results.

### Keywords

wagon turnover, freight turnover, forecasting, trend models, expert assessments, hierarchy analysis method

### For citation

Krakovskii Yu.M., Kramynina G.N. Obobshchennoe prognozirovanie oborota vagona po kompleksnoi modeli, uchityvayushchei statisticheskuyu i ekspertnyuyu informatsiyu [Generalized forecasting of wagon turnover using a complex model that takes into account statistical and expert information]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 145–153. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).145-153.

### Article info

Received by April 2, 2024; Revised: April 9, 2024; Accepted: April 10, 2024.

### Введение

Железнодорожный транспорт – сложная динамическая система, влияние на которую оказывают большое число различных факторов. В первую очередь необходимо обеспечивать безопасность перевозочного процесса за счет надежности и технологичности инфраструктурного комплекса сети железнодорожных дорог [1–4].

Важной задачей является повышение пропускной способности сети за счет полигонных технологий, специальной организации «окон», необходимых для выполнения ремонтно-восстановительных работ и других средств [5–7].

Также в настоящее время большое количество исследований посвящено вопросам повышения показателей перевозочной работы, характеризующих эффективность перевозочного процесса через их прогнозирование [8, 9]. Отметим работы, использующие корреляционно-регрессионный анализ и многофакторную регрессию [10, 11], вероятностные методы прогнозирования [12], а также технологии нейронных сетей [13–15].

Корреляцию и регрессию принято рассматривать как совокупный процесс статистического исследования, поэтому их использование в статистике часто именуют корреляционно-регрессионным анализом.

Наиболее распространенным методом для изучения воздействия факторов и дальнейшего прогнозирования являются прогнозные модели, описывающие зависимость исследуемого показателя от влияющих на него факторов. Влияющие факторы могут быть управляемыми и неуправляемыми. В работе [8] были выявлены наиболее влияющие факторы на исследуемый

показатель с помощью линейной многофакторной модели и модели в пространстве состояний, а также рассмотрено развитие системы в зависимости от изменения управляемых и неуправляемых факторов. В данном случае было выявлено, что лучший результат дает линейная многофакторная модель, но при условии прогнозирования на небольшой срок, а влияющие факторы являются управляемыми и на их значения можно повлиять.

В качестве комплексного метода может использоваться сценарный подход. Метод сценарного прогнозирования дает возможность определить вероятные тенденции развития событий и возможные последствия принимаемых решений с целью выбора наиболее подходящей альтернативы управления.

Сценарий по своему описанию является фундаментом для исходной информации, с опорой на который строится дальнейшая работа по прогнозированию развития ситуации. В связи с чем любой сценарий в готовом виде должен быть тщательно проанализирован [16].

Для сложных систем также может применяться метод экспертных оценок. Суть метода заключается в том, что при получении прогнозных оценок используется мнение персонала, постоянно эксплуатирующего исследуемый объект. Например, в работе [17] описан метод экспертных оценок для прогнозирования сложных технических объектов. Начальный этап – это выбор группы экспертов и сбор экспертной информации, далее обработка индивидуальных оценок и получение обобщенной оценки. На основании полученной информации разрабатывается математическая прогнозная модель, как правило эксперты уточняют пределы значения показателей (наиболее низкий уровень значения

исследуемого показателя и наиболее высокий).

Особенностью технологии получения прогнозов путем экспертного прогнозирования является системность этого метода. Он состоит из системно-образующих элементов и подсистем, которые в совокупности способны дать полноценную оценку исследуемому объекту или процессу, особенно в совокупности со статистическими и математическими методами прогнозирования [9].

Однако для трудноформализуемых, сложных динамических систем использование классических методов не всегда рационально: они либо показывают недостаточную точность, либо становятся чрезмерно трудоемкими в реализации [18].

Одним из вариантов решения этой проблемы является использование нейросетевого моделирования, т.е. математической модели, в основе которой лежит искусственная нейронная сеть, настроенная на работу с параметрами определенной динамической системы [19].

С использованием искусственных нейронных сетей может быть решено большинство проблем на железнодорожном транспорте, однако при разработке следует определить подходящую архитектуру нейронной сети, способ обучения, объем обучающей выборки и программные продукты для реализации модели [12].

В работе [20] проведено исследование прогнозирования качества функционирования технического устройства с помощью метода машинного обучения. Выборка данных была разделена на две части: обучающую (для построения математических моделей) и тестовую (для оценки качества полученной модели). Качество модели было предложено оценить с помощью средней абсолютной процентной ошибки (Mean Absolute Percentage Error):

$$MAPE = \frac{1}{l_T} \sum_{i=1}^{l_T} \frac{|\tilde{y}_i - y_i|}{y_i} \cdot 100\%,$$

где  $y_i$  – опытное значение отклика в  $i$ -м наблюдении;  $\tilde{y}_i$  – прогнозируемое значение отклика по рассматриваемой модели;  $l_T$  – объем тестовой выборки.

Целью исследования была разработка математической модели с наименьшим значением ошибки MAPE для обеспечения точного прогноза.

В данной работе использован метод «Random forest» («случайный лес») – это алго-

ритм машинного обучения, предложенный Л. Брейманом [21]. Этот метод содержит множество отдельных решающих деревьев. Важно отметить, что каждое дерево строится независимо друг от друга на разных подвыборках обучающих данных, при обучении каждого дерева используются разные комбинации исследуемых значений объекта, для которого реализуется прогнозирование.

Рассмотрим кратко бинарное прогнозирование на основе вероятностной нейронной сети (ВНС), предложенное в работе [14] для прогнозирования показателей перевозочного процесса железнодорожным транспортом.

Задан ряд показателя:  $Q = \{q_t : t \in T\}$ , где  $q_t$  – значения показателя в моменты времени  $t$ . Пусть интервал возможных значений показателя  $(c_1; c_2)$ ,  $c_1 > 0$ ,  $c_2 < \infty$ ;  $c$  – внутренняя точка:  $c_1 < c < c_2$ . Тогда интервал разбивается на два:

$$I_a = (c_1; c], I_b = (c; c_2). \quad (1)$$

Бинарное прогнозирование заключается в определении, в каком интервале (1) будет прогнозируемое значение. Это очень распространенная постановка, например необходимо знать: в будущем году оборот вагона будет больше или меньше текущего значения.

Значение внутренней точки равно:

$$c = q_{n-1} + \Delta; \quad (2)$$

$$\Delta = \alpha \cdot \left( \sum_{t=1}^{n-1} |q_t - q_{t-1}| \right) / (n-1),$$

где коэффициент  $\alpha \in [-1; 1]$ .

Если коэффициент в формуле (2) равен нулю, то внутренняя точка равна текущему значению.

Таким образом, на момент  $t = n - 1$  требуется найти, в каком из интервалов (1) будет находиться неизвестное значение  $q_{t+p}$  на основе оценок вероятностей  $p_{t+p}^a$  и  $p_{t+p}^b$ , где  $p = 1, \dots, r$  – время упреждения;  $p_{t+p}^a$  – вероятность того, что  $q_{t+p} \in I^a$ ;  $p_{t+p}^b$  – вероятность того, что  $q_{t+p} \in I^b$ ;  $p_{t+p}^a + p_{t+p}^b = 1$ .

Бинарное прогнозирование проводится по правилу для будущего значения:

$$q_{t+p} \in I^a, \text{ если } p_{t+p}^a \geq p_{t+p}^b; \quad (3)$$

$$q_{t+p} \in I^b, \text{ если } p_{t+p}^b \geq p_{t+p}^a.$$

Финальный нейрон вероятностной нейронной сети вычисляет бинарное значение:

$$\Omega_h = \begin{cases} 1, & \tilde{\rho}_{t+p}^b > \tilde{\rho}_{t+p}^a \\ 0, & \tilde{\rho}_{t+p}^a \geq \tilde{\rho}_{t+p}^b, \end{cases} \quad (4)$$

где оценки вероятностей  $\tilde{\rho}_{t+p}^a$  и  $\tilde{\rho}_{t+p}^b$  вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_{t+p}^a &= \frac{l_h^A}{l_h^A + l_h^B}, \\ \tilde{\rho}_{t+p}^b &= \frac{l_h^B}{l_h^A + l_h^B}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $l_h^A$  и  $l_h^B$  – значения, получаемые с помощью нелинейной активационной функции, зависящей от векторов обучения и векторов с неизвестной классификацией.

С учетом правила (3) значение 1 в функции (4) означает, что значение показателя попадет в интервал  $l_b$ , а при значении 0 – в интервал  $l_a$ . Оценки вероятностей определяются по формуле (5).

Как уже отмечалось, в качестве комплексного метода может использоваться сценарный подход, когда создаются различные прогнозные модели с учетом сценариев развития перевозочного процесса, дополнительно, помимо статистической, используется экспертная информация [22, 23].

Данное исследование является развитием работы [23], заключающееся в использовании методики, приведенной и апробированной в этой работе, но применительно к другому базовому показателю. Дополнительно изменена технология определения весовых коэффициентов для комплексного критерия.

Целью данной работы является апробация технологии прогнозирования базового показателя на примере оборота вагона (ОборВ) с учетом сценариев развития перевозочного процесса и дополнительной экспертной информации.

ОборВ – это один из важных показателей, так как при его сокращении увеличивается объем перевозки грузов. Этот показатель оценивает среднее время в сутках по использованию вагона от погрузки до следующей погрузки.

### Математическое обеспечение прогнозирования на основе многофакторных и трендовых моделей

В данной работе проведено исследование о влиянии восьми влияющих факторов на ОборВ. Используя выборочный коэффициент

парной корреляции и статистический анализ о значимости коэффициентов, были получены три значимых фактора (табл. 1).

Таблица 1. Исходные данные  
Table 1. Initial data

Год Year	$q$	$z_3$	$z_4$	$z_5$
1	4,01	11,25	223,98	47,30
2	4,69	9,90	248,44	43,80
3	4,46	10,57	257,94	43,30
4	3,88	11,76	278,19	46,00
5	3,86	12,08	304,79	45,70
6	3,71	12,38	313,45	45,70
7	3,68	12,56	324,68	46,20
8	3,58	13,34	357,80	46,60
9	3,50	13,92	377,73	46,70
10	3,87	13,40	363,40	45,00
11	6,21	8,14	379,30	46,30
12	5,99	8,67	398,00	46,20
13	6,49	8,20	421,40	41,30
14	7,79	6,90	429,00	39,23
15	6,76	8,18	447,70	42,88
16	6,37	9,11	465,60	43,80
17	6,34	9,61	507,40	43,50
18	6,14	10,16	543,70	44,40
19	6,15	10,27	571,10	44,90
20	6,86	9,11	571,40	42,20
21	6,61	9,11	581,20	41,10

Таким образом были получены факторы, значимо влияющие на исследуемый показатель – оборот вагона ( $q$  – ОборВ, сут.), это: производительность вагона ( $z_3$  – ПроизВ, тыс. т·км нетто), грузооборот ( $z_4$  – ГрОб, млн т·км), участковая скорость ( $z_5$  – УчСкор, км/ч.).

Из данных табл. 1 видно, что оборот вагона в последние годы ухудшается, это относится и к участковой скорости, и к производительности вагона. При этом грузооборот растет.

Подчеркнем, что в табл. 1 приведены исходные данные по базовому показателю и трем влияющим данным за последние 20 лет. Следующий год является прогнозным.

Используя метод наименьших квадратов и данные из табл. 1 с 1 по 20 строки, найдем трехфакторную модель для ОборВ относительно этих значимых факторов:

$$q = 11,303 - 0,476 \cdot z_3 + 0,005 \cdot z_4 - 0,07 z_5. \quad (6)$$

Для модели (6) значение  $F$ -статистики равно 598,2. Это значение подтверждает статистическую значимость этой модели.

Для обоснованных значимых факторов получены трендовые модели, необходимые для прогнозирования значений по модели (6), они приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Трендовые модели  
**Table 2.** Trendy models

Факторы Factors	Модели Models
ПроизВ	$s = -0,17t + 12,25$ (7)
ГрОб	$g = 17,64t + 204,08$ (8)
УчСкор	$v = -1,33t + 69,92$ (9)
ОборВ	$h = 0,18t + 3,29$ (10)

Далее к статистической информации добавим точечные экспертные оценки практиков-экспертов и авторов работы двум вариантам (В): первый вариант предполагает увеличение значений прогнозируемых показателей относительно последнего года; второй вариант предполагает уменьшение этих значений по сравнению с последним годом (табл. 3).

**Таблица 3.** Значения точечных экспертных оценок  
**Table 3.** Values of point expert estimates

В	ОборВ	ПроизВ	ГрОб	УчСкор
1	6,90	9,40	585,00	45,00
2	6,60	9,00	570,00	42,00

Итоговой моделью прогнозирования значений базового показателя, которым является оборот вагона, является линейная свертка значений частных моделей. Этими частными моделями являются:  $g_1$  – трехфакторная модель, зависящая от значимых факторов;  $g_2$  – трендовая модель;  $g_3$  – экспертное значение.

При использовании статистических данных по ОборВ и значимым факторам, а также экспертных оценок, созданы трендовые модели.

Трендовые модели для первого варианта приведены в табл. 4, трендовые модели для второго варианта – в табл. 5.

**Таблица 4.** Трендовые модели для варианта 1  
**Table 4.** Trendy models for option 1

Факторы Factors	Модели Models
ПроизВ	$s = -0,16t + 12,19$ (11)
ГрОб	$g = 17,77t + 203,07$ (12)
УчСкор	$v = -0,13t + 46,05$ (13)
ОборВ	$h = 0,18t + 3,31$ (14)

**Таблица 5.** Трендовые модели для варианта 2  
**Table 5.** Trendy models for option 2

Факторы Factors	Модели Models
ПроизВ	$s = -0,17t + 12,23$ (15)
ГрОб	$g = 17,58t + 204,5$ (16)
УчСкор	$v = -0,17t + 46,34$ (17)
ОборВ	$h = 0,18t + 3,34$ (18)

В табл. 6 приведены рекомендованные экспертами и авторами сценарии развития перевозочного процесса 1–3 применительно к Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД).

Для сценария 1 используются лишь статистические данные (Стат). При вычислении значений ОборВ  $g_1$  используется модель (6), значения факторов ( $s$ ,  $g$ ,  $v$ ) определяются по трендовым моделям (7)–(9). Значение ОборВ  $g_2$  вычисляется по трендовой модели (10). Для показателя  $g_3$  экспертами принято значение 6,9 сут.

**Таблица 6.** Сценарии развития  
перевозочного процесса

**Table 6.** Transportation process development scenarios

Сценарии Scenarios	$g_1$	$g_2$	$g_3$
1	Стат	Стат	6,90
2	Стат + В1	Стат + В1	6,90
3	Стат + В2	Стат + В2	6,60

Для сценария 2 используются статистические данные и экспертные оценки по варианту 1 (см. табл. 6) (Стат + В1). В данном сценарии при вычислении значения ОборВ  $g_1$  используется модель (6), но значения факторов ( $s$ ,  $g$ ,  $v$ ) определяются по моделям (11)–(13). Значение ОборВ  $g_2$  вычисляется по модели (14). Для показателя  $g_3$  экспертами принято значение 6,9 сут.

Для сценария 3 используются статистические данные и экспертные оценки по второму варианту (см. табл. 6) (Стат + В2). В этом сценарии при вычислении значения ОборВ  $g_1$  используется модель (6), но значения факторов ( $s$ ,  $g$ ,  $v$ ) определяются по моделям (15)–(17). Значение ОборВ  $g_2$  вычисляется по модели (18). Для показателя  $g_3$  экспертами принято значение 6,6 сут.

Вычисление значения для обобщенного прогнозирования по каждому сценарию осуществляется по формуле (комплексная модель прогнозирования):

$$g_c(t+1) = \sum_{j=1}^3 w_j \cdot g_j(t+1), \quad (19)$$

где  $g_c$  – итоговое прогнозное значение оборота вагона;  $g_j$  – частное прогнозное значение по  $j$ -й модели;  $t$  – номер последнего года в исходном временном ряду (см. табл. 1);  $w_j$  – весовой коэффициент, учитывающий значимость  $j$ -й прогнозной модели.

Вычисление весовых коэффициентов предложено определять по методу анализа иерархий [24]. Особенностью этого метода является создание экспертами матрицы суждений  $A(a_{ij})$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ . Суждения  $a_{ij}$  можно проверить на непротиворечивость, что является положительной стороной данного метода.

Матрица суждений является обратносимметричной, а диагональные элементы  $a_{ij}$  равны 1. Суждения определяются в соответствии с предложенной шкалой [25]:

- если объекты  $o_i$  и  $o_j$  одинаково важны, то значение 1–2;
- если объект  $o_i$  незначительно важнее  $o_j$ , то значение 2–4;
- если объект  $o_i$  значительно важнее  $o_j$ , то значение 4–6;
- если объект  $o_i$  явно важнее  $o_j$ , то значение 6–8;
- если объект  $o_i$  абсолютно превосходит  $o_j$ , то значение 8–9.

В нашем случае объектами являются частные модели для вычисления показателя ОборВ:  $g_1$ , когда используется трехфакторная модель;  $g_2$ , когда используется трендовая модель;  $g_3$ , когда используется прогнозное экспертное значение.

Дополнительно объектами являются критерии: К1 – учет неопределенности перевозочного процесса; К2 – рост экономики в будущем; К3 – дефицит кадров.

### Апробация обобщенного прогнозирования оборота вагона по комплексной модели (19)

Ниже приведены четыре матрицы суждений, предложенные экспертами-практиками с участием авторов статьи (см. табл. 7–10).

**Таблица 7.** Матрица суждений для критериев  
**Table 7.** Judgment matrix for criteria

К	К1	К2	К3
К1	1	1/3	0,2
К2	3	1	1/3
К3	5	3	1

**Таблица 8.** Матрица суждений для моделей относительно критерия К1

**Table 8.** Judgment matrix for models relative to criterion K1

К1	$g_1$	$g_2$	$g_3$
$g_1$	1	2	1/3
$g_2$	0,5	1	0,2
$g_3$	3	5	1

**Таблица 9.** Матрица суждений для моделей относительно критерия К2

**Table 9.** Judgment matrix for models relative to criterion K2

К2	$g_1$	$g_2$	$g_3$
$g_1$	1	3	5
$g_2$	1/3	1	3
$g_3$	0,2	1/3	1

Размерности этих матриц суждения ( $n$ ) равны трем. Обработку этих матриц проведем приближенным методом, описанном в [25].

**Таблица 10.** Матрица суждений для моделей относительно критерия К3

**Table 10.** Judgment matrix for models relative to criterion K3

К3	$g_1$	$g_2$	$g_3$
$g_1$	1	1/3	5
$g_2$	3	1	5
$g_3$	0,2	0,2	1

В соответствии с этими рекомендациями весовые коэффициенты равны:

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (20)$$

В формуле (20) первоначально находятся произведения элементов матрицы суждений по строкам. Далее из этого произведения извлекается корень. Весовые коэффициенты являются долями от общей суммы.

Сумма коэффициентов для каждой матрицы равна 1.

Непротиворечивость суждений проверим с помощью отношения согласованности:

$$OS = IS/SI(n), \quad (21)$$

где  $SI(n)$  – случайный индекс, который определяется из [24]; в нашем случае  $SI(3) = 0,58$ ;  $IS$  – индекс согласованности, который равен

$$IS = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (22)$$

где  $\lambda_{\max}$  – максимальное собственное значение,

Табл. 11. Результаты апробации обобщенного прогнозирования оборота вагона

Table 11. Results of testing generalized forecasting of wagon turnover

Сценарии	$g_1$ (21)	$g_2$ (21)	$g_3$ (21)	$g_c$ (21)	$e$ , %
1	7,13	7,15	6,90	7,10	7,48
2	7,06	7,10	6,90	7,05	6,73
3	7,11	7,05	6,60	7,01	6,00

которое связано с собственным вектором матрицы. Это значение рекомендуется определять так:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n w_i B_{i \max}, \quad (23)$$

где  $w_i$  – весовые коэффициенты матрицы, а  $B_i$  – суммы элементов матрицы суждений по столбцам. Отношение согласованности (21) для всех матриц (см. табл. 6–9) с учетом (22), (23) оказались меньше рекомендуемого критического значения 0,1. Это позволило сделать вывод, что матрицы суждений не противоречивы и весовым коэффициентам можно доверять. Ниже приведены весовые коэффициенты матриц, полученные по формуле (20):

– табл. 7:

$$w_1 = 0,10; w_2 = 0,26; w_3 = 0,64; \quad (24)$$

– табл. 8:

$$w_1 = 0,23; w_2 = 0,12; w_3 = 0,65; \quad (25)$$

– табл. 9:

$$w_1 = 0,64; w_2 = 0,26; w_3 = 0,10; \quad (26)$$

– табл. 10:

$$w_1 = 0,30; w_2 = 0,62; w_3 = 0,09. \quad (27)$$

Итоговые весовые коэффициенты равны

$$w_i = \sum_{j=1}^3 z_j \cdot b_{ij}, i = 1, 2, 3; \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^3 w_i = 1.$$

В формуле (28)  $z_j$  – весовые коэффициенты (24);  $b_{ij}$  – элементы матрицы, содержащей весовые коэффициенты (25)–(27).

Используя формулу (28), получим итоговые весовые коэффициенты для моделей:

$$w_1 = 0,38; w_2 = 0,47; w_3 = 0,15.$$

В табл. 11 приведены результаты расчетов по рекомендованному сценарию. 21 – это номер года, на который делался прогноз. Дополнительно найдена относительная погрешность в процентах ( $e$ ) итогового прогнозного значения относительно фактического значения, взятого из

21 строки табл. 1.

В настоящий момент известно, что ОборВ в прогнозном году на ВСЖД равен 6,61 сут., он уменьшился по сравнению с предыдущим годом (6,86 сут.); УчСкор равна 41,1 км/ч., она также уменьшилась (42,2 км/ч.); ПроизВ равна 9,1 тыс. т·км, она осталась на прежнем уровне.

### Заключение

В статье предложена и апробирована технология обобщенного прогнозирования ОборВ, основанная на комплексном показателе (19), который учитывает различные виды прогнозных моделей с использованием статистической и экспертной информации и применением различных сценариев. В нашем случае обобщенное прогнозирование основано на трех значениях ОборВ с различными весами:

– значение, полученное по трехфакторной модели;

– значение, полученное по трендовой модели;

– точечное экспертное суждение.

Весовые коэффициенты получены с помощью метода анализа иерархий, когда дополнительно использовалось три критерия. Это потребовало создать четыре матрицы суждений, что повысило точность получения итоговых весовых коэффициентов.

Показана хорошая практическая точность этого прогнозирования по всем трем сценариям, хотя сами модели прогнозирования дают заметную погрешность. Из трех рассмотренных сценариев наиболее близкое значение показал третий сценарий. Итоговое прогнозное значение равно 7,01 сут., а фактическое – 6,61 сут. Относительная погрешность равна 6,0 %, т.е. и в условиях неопределенности перевозочного процесса обобщенное прогнозирование, основанное на комплексном критерии, дает хорошие практические результаты.

### Список литературы

1. Фролов В.Ф., Хоменко А.П. Комплексная полигонная технология эксплуатационной работы // Железнодорожный транспорт. 2016. №2. С. 43–46.
2. Козлов П.А., Вакуленко С.П., Колокольников В.С. Расчет и оптимизация полигонов железнодорожного транспорта // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2017. № 3 (67). С. 96–101.



3. Бирюзов В.П. Об основных направлениях развития систем диагностики и мониторинга путевого хозяйства до 2025 г. // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 4. С. 4–8.
4. Антипов А.Г., Марков А.А. Новые возможности магнитодинамического метода контроля рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 8. С. 27–32.
5. Осминин А.Т., Мехедов М.И., Медников Д.В. Обеспечение интероперабельности перевозок // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 11–17.
6. Розенберг Е.Н., Аношкин В.В. Перспективы роста пропускной способности участков // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 4–7.
7. Сотников Е.А., Мехедов М.И., Холодняк П.С. Интенсификация роста загруженных направлений сети железнодородных дорог // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 11–14.
8. Варламова С.А., Якушев М.В., Веселов Д.А. Прогнозирование количества пассажиров, перевезенных автобусами общего пользования в Пермском крае // Информационные технологии в управлении и экономике. 2020. № 2 (19). С. 50–58.
9. Маловецкая Е.В., Козловский А.П. Анализ моделей и принципов системного моделирования при построении прогнозных моделей погрузки грузов // International journal of open information technologies. 2020. Т. 8. № 12. С. 39–48.
10. Базилевский М.П. Прогнозирование грузооборота железнодорожного транспорта по регрессионным моделям с детерминированными и стохастическими объясняющими переменными // Научн. ведомости Белгород. гос. ун-та. Сер.: Экономика. Информатика. 2019. Т. 46. № 1. С. 117–129.
11. Давааня Т., Михайлова Е.А., Яхина А.С. Модели многофакторного оценивания основных показателей перевозки грузов // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2015. № 12 (127). С. 80–86.
12. Сивицкий Д.А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 2 (57). С. 33–41.
13. Short-term forecasting of categorical changes in wind power with Markov chain models / M. Yoder, A.S. Hering, W.C. Navidi et al. // Wind energy. 2014. № 17. P. 1425–1439.
14. Краковский Ю.М., Куклина О.Н. Бинарное прогнозирование динамических показателей на основе методов машинного обучения // Вестн. Томск. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 62. С. 50–55.
15. Krakovsky Y., Luzgin A. Robust interval forecasting algorithm based on a probabilistic cluster model // Journal of statistical computation and Simulation. 2018. Vol. 88, Iss. 12. P. 2309–2324.
16. Волкова В.Н., Черненькая Л.В., Магер В.Е. Классификация моделей в системном анализе // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. №3 (174). С. 33–43.
17. Гула Д.Н., Головчинский В.О. Прогнозирование технического состояния сложных технических комплексов на основе экспертной информации // Изв. Тульск. гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 3. С. 260–264.
18. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М. : Горячая линия-Телеком, 2010. 496 с.
19. Хайкин С. Нейронные сети : полный курс. М. : Вильямс, 2006. 1104 с.
20. Прогнозирование качества функционирования технического объекта с использованием машинного обучения / М.И. Корнилова, С.В. Бусыгин, В.Н. Ковальногов и др. // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4 (44). С. 152–158.
21. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. № 1. P. 5–32.
22. Краковский Ю.М., Попова Н.Н. Обобщенное прогнозирование показателя погрузки грузов при перевозке железнодорожным транспортом // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. 2020. № 3. С. 43–50.
23. Краковский Ю.М., Крамынина Г.Н. Исследование сценариев прогнозирования грузооборота на железной дороге с учетом экспертной информации // System Analysis & Mathematical Modeling. 2023. Т. 5. № 4. С. 417–424.
24. Саати Т.Л. Принятие решений : Метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1993. 314 с.
25. Микони С.В. Теория и практика рационального выбора. М. : Маршрут, 2004. 462 с.

## References

1. Frolov V.F., Khomenko A.P. Kompleksnaya poligonnaya tekhnologiya ekspluatatsionnoi raboty [Complex landfill technology of operational work]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2016, no. 2, pp. 43–46.
2. Kozlov P.A., Vakulenko S.P., Kolokol'nikov V.S. Raschet i optimizatsiya poligonov zheleznodorozhnogo transporta [Calculation and optimization of polygons of railway transport]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2017, no. 3 (67), pp. 96–101.
3. Biryuzov V.P. Ob osnovnykh napravleniyakh razvitiya sistem diagnostiki i monitoringa putevogo khozyaistva do 2025 g [On the main directions of development of diagnostic and monitoring systems for track facilities until 2025]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2015, no. 4, pp. 4–8.
4. Antipov A.G., Markov A.A. Novye vozmozhnosti magnitodinamicheskogo metoda kontrolya rel'sov [New possibilities of the magnetodynamic method of rail control]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2016, no. 8, pp. 27–32.
5. Os'minin A.T., Mehedov M.I., Mednikov D.V. Obespechenie interoperabel'nosti perevozk [Ensuring the interoperability of transportation]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2019, no. 7, pp. 11–17.
6. Rosenberg E.N., Anoshkin V.V. Perspektivy rosta propusknoi sposobnosti uchastkov [Prospects for the growth of the capacity of sections]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway Transport], 2020, no. 3, pp. 4–7.
7. Sotnikov E.A., Mehedov M.I., Kholodnyak P.S. Intensifikatsiya rosta zagruzhennykh napravlenii seti zheleznykh dorog [Intensification of the growth of busy areas of the railway network]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2020, no. 3, pp. 11–14.
8. Varlamova S.A., Yakushev M.V., Veselov D.A. Prognozirovaniye kolichestva passazhirov, perevezennykh avtobusami obshchego pol'zovaniya v Permskom krae [Forecasting the number of passengers transported by public buses in the Perm' re-

gion]. *Informatsionnyye tekhnologii v upravlenii i ekonomike* [Information technologies in management and economics], 2020, no. 2 (19), pp. 50–58.

9. Malovetskaya E.V., Kozlovskii A.P. Analiz modeli i printsipov sistemnogo modelirovaniya pri postroenii prognoznnykh modeli pogruzki грузов [Analysis of models and principles of system modeling in the construction of forecast models of cargo loading]. *International journal of open information technologies*, 2020, vol. 8, no. 12, pp. 39–48.

10. Bazilevskii M.P. Prognozirovaniye gruzooborota zheleznodorozhnogo transporta po regressionnym modelyam s determinirovannymi i stokhasticheskimi ob'yasnyayushchimi peremennymi [Forecasting the freight turnover of railway transport using regression models with deterministic and stochastic explanatory variables]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series: Economics. Computer science], 2019, vol. 46, no. 1, pp. 117–129.

11. Davaanyam T., Mikhailova E.A., Yakhina A.S. Modeli mnogofaktornogo otsenivaniya osnovnykh pokazatelei perevozki грузов [Models of multifactorial assessment of the main indicators of cargo transportation]. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Trans-Baikal State University], 2015, no. 12 (127), pp. 80–86.

12. Sivitskii D.A. Analiz opyta i perspektiv primeneniya iskusstvennykh neironnykh setei na zheleznodorozhnom transporte [Analysis of the experience and prospects of using artificial neural networks in railway transport]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2021, no. 2 (57), pp. 33–41.

13. Yoder M., Hering A.S., Navidi W.C., Larson K. Short-term forecasting of categorical changes in wind power with Markov chain models. *Wind energy*, 2014, no. 17, pp. 1425–1439.

14. Krakovskii Yu.M., Kuklina O.N. Binarnoe prognozirovaniye dinamicheskikh pokazatelei na osnove metodov mashinnogo obucheniya [Binary forecasting of dynamic indicators based on machine learning methods]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Tomsk State University. Management, computer engineering and computer science], 2023, no. 62, pp. 50–55.

15. Krakovsky Y., Luzgin A. Robust interval forecasting algorithm based on a probabilistic cluster model. *Journal of statistical computation and Simulation*, 2018, vol. 88, iss. 12, pp. 2309–2324.

16. Volkova V.N., Chernenkaya L.V., Mager V.E. Klassifikatsiya modeli v sistemnom analize [Classification of models in system analysis]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific and technical achievements of St. Petersburg State Polytechnic University. Computer science. Telecommunications. Management], 2013, no. 3 (174), pp. 33–43.

17. Gula D.N., Golovchinskii V.O. Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh kompleksov na osnove ekspertnoi informatsii [Forecasting the technical condition of complex technical complexes based on expert information]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of Tula State University. Technical sciences], 2021, no. 3, pp. 260–264.

18. Galushkin A.I. Neironnye seti: osnovy teorii [Neural networks: fundamentals of theory]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2010. 496 p.

19. Haykin S. Neironnye seti: polnyi kurs [Neural networks: a comprehensive Foundation]. Moscow: Williams Publ., 2006. 1104 p.

20. Kornilova M.I., Busygin S.V., Koval'nov V.N., Klyachkin V.N. Prognozirovaniye kachestva funktsionirovaniya tekhnicheskogo ob'yekta s ispol'zovaniem mashinnogo obucheniya [Forecasting the quality of functioning of a technical object using machine learning]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2023, no. 4 (44), pp. 152–158.

21. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, vol. 45, no. 1, pp. 5–32.

22. Krakovskii Yu.M., Popova N.N. Obobshchennoe prognozirovaniye pokazatelya pogruzki грузов pri perevozke zheleznodorozhnym transportom [Generalized forecasting of the indicator of cargo loading during rail transportation]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: System analysis and information technology], 2020, no. 3, pp. 43–50.

23. Krakovskii Yu.M., Kramynina G.N. Issledovaniye stsensariy prognozirovaniya gruzooborota na zheleznoi doroge s uchetoм ekspertnoi informatsii [Research of scenarios for forecasting freight turnover on the railway, taking into account expert information]. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 417–424.

24. Saati T.L. Prinyatie reshenii: Metod analiza ierarkhii [Decision-making: The method of hierarchy analysis]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1993. 314 p.

25. Mikoni S.V. Teoriya i praktika ratsional'nogo vybora [Theory and practice of rational choice]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 462 p.

### Информация об авторах

**Краковский Юрий Мечеславович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru.

**Крамьнина Галина Николаевна**, аспирант кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kramynina.gala@yandex.ru.

### Information about the authors

**Yurii M. Krakovskii**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru.

**Galina N. Kramynina**, Ph.D Student of Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kramynina.gala@yandex.ru.

## Анализ основных показателей работы схемы электроснабжения распределительных электрических сетей г. Чита

С.Ю. Елпашев✉

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

✉elkka64@mail.ru

### Резюме

В статье рассматривается район электроснабжения г. Чита, где реализуется три вида устройств: по производству электрической энергии (электрические станции), по передаче и распределению электроэнергии (электрические сети) и по потреблению электроэнергии в производственных и бытовых нуждах (приемники электроэнергии). С учетом того, что электрические сети в городах являются очень обширными и сложными, к ним предъявляют определенные технико-экономические требования: надежность, эффективность и энергоэффективность. В связи с этим важно обеспечить безопасность эксплуатации и обслуживания электрических сетей, чтобы избежать аварийных ситуаций и гарантировать бесперебойное электроснабжение городских жителей. Для организации эффективного функционирования электрических сетей необходимо проводить регулярное техническое обслуживание и модернизацию оборудования. Также нужно постоянно внедрять современные технологии управления и мониторинга сетей, чтобы повысить их надежность и производительность. Кроме того, для оптимизации работы электрических сетей требуется также учитывать специфику городской застройки и потребления электроэнергии, разрабатывать гибкие схемы распределения электроэнергии и проводить оценку нагрузки для ее балансировки и предотвращения перегрузок сетей. В целом обеспечение эффективного функционирования электрических сетей в городах требует комплексного подхода, включающего в себя технические, организационные и экономические меры, а также учет специфики городской среды и потребления электроэнергии. В связи с этим автором предложено снизить технологические потери электроэнергии в городских условиях.

### Ключевые слова

потери, трансформатор, линии электроснабжения, линии электрических передач, электроэнергия, электрическая сеть, оборудование, провода

### Для цитирования

Елпашев С.Ю. Анализ основных показателей работы схемы электроснабжения распределительных электрических сетей г. Чита / С.Ю. Елпашев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 154–167. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).154-167.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 28.03.2024 г.; поступила после рецензирования: 08.04.2024 г.; принята к публикации: 10.04.2024 г.

## Analysis of the main performance indicators of the scheme power supply of distribution electric networks of the Chita city

S.Yu. Elpashev✉

Transbaikal Institute of Railway Transport, Chita, the Russian Federation

✉elkka64@mail.ru

### Abstract

The article considers the power supply area of the city of Chita, where three types of devices are implemented: for the production of electric energy (electric power plants), for the transmission and distribution of electric energy (electric networks) and for the consumption of electric energy for industrial and household needs (electricity receivers). Considering that electric networks in cities are very extensive and complex, certain technical and economic requirements are imposed on them: reliability, efficiency and energy efficiency. In this regard, it is important to ensure the safety of operation and maintenance of electric networks in order to avoid emergency situations and guarantee uninterrupted power supply to city residents. To organize the effective functioning of electric networks, it is necessary to carry out regular maintenance and modernization of equipment. It is also necessary to constantly introduce modern technologies for network management and monitoring in order to increase their reliability and productivity. In addition, to optimize the operation of electric networks, it is also necessary to take into account the specifics of urban development and electricity consumption, develop flexible electricity distribution schemes and assess the load for its balancing and prevent network overloads. In general, ensuring the efficient operation of electric networks in cities requires a comprehensive approach, including technical, organizational and economic measures, as well as taking into account the specifics of the urban environment and electricity consumption. In this regard, the author proposes to reduce technological losses of electricity in urban conditions.

**Keywords**

losses, transformer, power supply lines, transmission lines, electric power, electric network, equipment, wires

**For citation**

Elpashev S.Yu. Analiz osnovnykh pokazatelei raboty skhemy elektrosnabzheniya raspredelitel'nykh elektricheskikh setei g. Chita [Analysis of the main performance indicators of the scheme power supply of distribution electric net-works of the Chita city]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 154–167. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).154-167.

**Article Info**

Received: March 28, 2024; Revised: April 8, 2024; Accepted: April 10, 2024.

**Введение**

Технологические потери – самая обширная категория, имеющая максимальный удельный вес в общем объеме потерь электроэнергии. Данную категорию представляют потери, связанные с передачей производителями электроэнергии своей продукции посредством воздушных линий электрической передачи (ЛЭП). Основными ее составляющими являются нагрузочные потери и потери за счет образования коронных разрядов, на которые уходит более 80 % всех потерь, остальные 20 % приходятся на потери в остальном технологическом оборудовании (потери трансформаторов напряжения, потери холостого хода и т.д.).

Причинами таких потерь являются: высокие нагрузочные токи и сопротивление проводов ЛЭП; условно-постоянные расходы (затраты на холостую работу силового оборудования, борьбу с реактивными нагрузками и пр.); климатические условия (потери на коронных разрядах и оттаивание обледенелых проводов).

Вторая категория потерь характеризуется расходом электроэнергии, необходимой для питания технологического оборудования подстанций, удовлетворения нужд персонала. Учет такого потребления электроэнергии ведется с помощью специальных учетных приборов.

Причины коммерческих потерь: погрешности расчетов; ошибки в тарифах по отпуску электроэнергии; погрешности показаний приборов учета; хищение электроэнергии.

Целью данной статьи является полный анализ схемы электроснабжения распределительных сетей для последующего снижения технологических потерь.

### **Анализ показателей работы схемы электроснабжения распределительных электрических сетей**

Эффективность работы схемы электроснабжения распределительных электрических

сетей (РЭС) во многом определяются технологическими потерями в основных ее элементах (линиях, трансформаторах) и коэффициентом загрузки силовых трансформаторов, также влияющим на эти потери. Поскольку для расчета технологических потерь в трансформаторах необходимо знание коэффициента загрузки силового трансформатора, начнем с расчета этого показателя по схеме электроснабжения РЭС г. Читы в общем случае по формуле (1) [1]:

$$K_{зтi} = \frac{S_{\text{факт.т.}i}}{S_{\text{ном.т.}i}}, \quad (1)$$

где  $K_{зтi}$  – коэффициент загрузки  $i$ -го трансформатора;  $S_{\text{факт.т.}i}$  – фактическая полная мощность нагрузки  $i$ -го трансформатора, кВА;  $S_{\text{ном.т.}i}$  – номинальная полная мощность  $i$ -го трансформатора, кВА.

Для определения  $S_{\text{факт.т.}i}$  будем использовать данные потребления активной мощности  $\mathcal{E}_{ai}$  по присоединениям РЭС г. Читы за 2023 г., предоставленные НТЭЛ-1 линейным отделом Трансэнерго.

Средняя мощность определяется по (2) [2]:

$$S_{\text{ср} \pi i} = \frac{\mathcal{E}_{ai}}{\cos \varphi \cdot T_{\text{рк}}}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_{ai}$  – расход активной электроэнергии по присоединениям, за 2023 г., кВт · ч;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности;  $T_{\text{рк}}$  – число часов работы данного трансформатора в год (для трансформаторов, питающих жилой сектор – 8 760 ч., для трансформаторов, питающих промышленную нагрузку, работающую в три смены – 8 400 ч., в две смены – 4 500 ч., в одну смену – 2 250 ч.) [3].

Согласно рекомендациям [4] при отсутствии точных инструментальных данных замеров рекомендуется использовать в расчетах  $\text{tg} \varphi = 0,6$ , которому соответствует значение  $\cos \varphi = 0,85$ .

Произведем расчет на примере ТП-1,

ввод Т1. От данной тяговой подстанции (ТП) питаются потребители локомотивного депо, работающего в три смены, для которого  $T_{\text{рк}} = 8\,400$  ч. Тогда:

$$K_{3\text{ ср}} = \frac{955\,060,31}{0,85 \cdot 8400 \cdot 400} = 0,33.$$

Для оценки загрузки ТП в максимальном режиме выполним следующий расчет.

Средняя мощность определяется по (3) [5]:

$$P_{\text{ср}} = \frac{\mathcal{E}_{ai}}{T_{\text{рк}}}, \quad (3)$$

где  $\mathcal{E}_{ai}$  – расход активной электроэнергии по присоединениям, за 2023 г., кВт·ч;  $T_{\text{рк}}$  – число часов работы данного трансформатора в год.

Максимальная мощность определяется по формуле (4):

$$P_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}_{ai\text{ max}}}{T_{\text{рк мес}}}, \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}_{ai\text{ max}}$  – расход активной электроэнергии по присоединениям в месяцы максимальных нагрузок (январь и декабрь) за 2023 г., кВт·ч;  $T_{\text{рк мес}}$  – число часов работы данного трансформатора в месяц.

Коэффициент увеличения определяется по формуле (5):

$$K_{\text{ув}} = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{ср}}}, \quad (5)$$

Коэффициент загрузки максимальный по формуле (6):

$$K_3 = K_{3\text{ ср}} \cdot K_{\text{ув}}. \quad (6)$$

Для оценки загрузки всех ТП в максимальном режиме выполним расчет на примере ТП-1, ввод Т1. Расход активной электроэнергии по присоединениям  $\mathcal{E}_{ai}$ , число часов работы трансформаторов  $T_{\text{рк}}$  и средний коэффициент загрузки силовых трансформаторов используем из табл. 2.

**Таблица 1.** Определение загрузки силовых трансформаторов  
**Table 1.** Determination of the loading of power transformers

Наименование тяговой подстанции Name of traction substation	$T_{\text{рк}}$ , ч	$S_{\text{ном т}}$ , кВт	$\mathcal{E}_a$ , кВт·ч	$K_{3\text{ ср}}$
ТП-1, ввод Т1	8 400	400	955 060,31	0,33
ТП-1, ввод Т2	8 400	630	5,56	0,000001
ТП-17, ввод Т1	4 500	200	197 967,62	0,25
ТП-20, ввод Т1	4 500	250	168 840	0,17
ТП-28, ввод Т1	4 500	630	466 075,19	0,19
ТП-28, ввод Т2	4 500	560	0,00	0,00
ТП-6, ввод Т2	2 250	400	202 119,74	0,26
ТП-7, ввод Т1	4 500	2 × 400	614 200	0,20
ТП-8, ввод Т1	8 400	400	573 360	0,20
ТП-8, ввод Т-2	8 400	630	0,00	0,00
ТП-19, ввод Т1	2 250	2 × 400	38 880	0,05
ТП-19, ввод Т2	2 250	2 × 400	194 880	0,25
ТП-23, ввод Т1	2 250	250	56 880	0,11
ТП-23, ввод Т-2	8 400	630	0	0
ЦРП, ввод Т1	4 500	2 × 630	1 536 216,93	0,63
ТП-2, ввод Т1	8 400	400	0	0
ТП-2, ввод Т2	2 250	250	207 200	0,43
ТП-2а, ввод Т1	8 400	2 × 630	645 760	0,14
ТП-3,	8 400	250	752 911,17	0,42
ТП-4, ввод Т1	8 400	250	568 353,59	0,31
ТП-9, ввод Т1	4 500	400	436 278,90	0,28
ТП-9, ввод Т-2	8 400	250	102 765,99	0,05
ТП-13, ввод Т2	8 400	2 × 630	378 200	0,08
ТП-37, ввод Т1	4 500	2 × 630	705 200	0,29
ТП-37, ввод Т2	4 500	2 × 630	284 600	0,11
КТПН-ДОЛБр	8 400	400	234 240	0,08
КТПН АБЗ ТЧЭ	2 250	2 × 630	152 800	0,12
КТП-630 кВА	8 400	630	1 532 700	0,34
$\Sigma \mathcal{E}_a$			11 290 095,03	

$$P_{cp} = \frac{955600}{8400} = 113,69 \text{ кВт};$$

$$P_{max} = \frac{127952}{700} = 182,78 \text{ кВт};$$

$$K_{ув} = \frac{182,78}{113,69} = 1,60;$$

$$K_{з max} = 0,33 \cdot 1,60 = 0,53.$$

Отразим результаты расчета в табл. 2.

По приведенному расчету можно сделать вывод о существовании режимов перегрузки по вводам ЦРП-Чита-1. Кроме этого, подобному воздействию подвергается ТП-17, также достаточно высокий коэффициент загрузки трансформаторов имеет ТП-3, ТП-4. У ТП-1 и ТП-2 следует учитывать наличие второго трансформатора, который при проведении замеров находился в резерве. Обращает на

себя внимание низкая загрузка ТП-20, ТП-28, ТП-7, ТП-8, ТП-19, ТП-23, ТП-2а, ТП-9, ТП-13, ТП-37 и КТПН-ДОЛБр, что можно учесть при оптимизации схемы или замены этих трансформаторов. Нагрузки на каждую подстанцию приведены в табл. 3.

Полученные результаты показывают среднегодовой коэффициент загрузки силовых трансформаторов, поскольку использованы данные годового потребления электроэнергии за 2023 г. Наиболее загруженными являются ТП-1 (ввод 1), ТП-7 (ввод 1), ТП-8 (ввод Т1), ТП-19 (ввод Т1), ТП-2 (ввод Т2), ТП-3, ТП-4 (ввод Т1).

Следует учитывать, что коэффициент загрузки в максимальном режиме гораздо выше и именно этот режим создает условия ускоренного износа изоляции и выхода трансформаторов из строя.

**Таблица 2.** Определение загрузки трансформаторов в максимальном режиме работы  
**Table 2.** Determination of transformer loading in maximum operating mode

Наименование тяговой подстанции Name of traction substation	$P_{cp}$ , кВт	$P_{max}$ , кВт	$\mathcal{E}_{a i max}$ , кВт · ч	$T_{рк мес}$ , ч	$K_{ув}$	$K_{з max}$
ТП-1, ввод Т1	113,69	182,78	127 952	700	1,60	0,53
ТП-1, ввод Т2	0,001	0,001	1,00	700	2,15	0,00
ТП-17, ввод Т1	43,99	174,12	65 296	375	3,95	1,02
ТП-20, ввод Т1	37,52	53,28	19 980	375	1,42	0,25
ТП-28, ввод Т1	103,57	150,82	56 557	375	1,45	0,28
ТП-28, ввод Т2	0,00	0,00	0,00	375	0,00	0,00
ТП-6, ввод Т2	89,83	167,13	31 337	187,50	1,86	0,49
ТП-7, ввод Т1	136,48	194,13	72 800	375	1,42	0,28
ТП-8, ввод Т1	68,25	115,88	81 120	700	1,69	0,34
ТП-8, ввод Т-2	0,00	0,00	0,00	700	0,00	0,00
ТП-19, ввод Т1	17,28	29,44	5 520	187,50	1,70	0,08
ТП-19, ввод Т2	86,61	121,17	22 720	187,50	1,39	0,35
ТП-23, ввод Т1	25,28	75,52	14 160	187,50	2,98	0,35
ТП-23, ввод Т-2	0,00	0,00	0,00	700	0,00	0,00
ЦРП, ввод Т1	341,38	641,44	240 540	375	1,87	1,19
ТП-2, ввод Т1	0,00	0,00	0	700	0,00	0,00
ТП-2, ввод Т2	92,08	116,26	21 800	187,50	1,26	0,54
ТП-2а, ввод Т1	76,87	95,20	66 640	700	1,23	0,17
ТП-3, ввод Т1	89,63	140,44	98 311	700	1,56	0,66
ТП-4, ввод Т1	67,66	146,43	102 504	700	2,16	0,68
ТП-9, ввод Т1	96,95	154,23	57 838	375	1,59	0,45
ТП-9, ввод Т-2	12,23	18,77	13 143	700	1,53	0,08
ТП-13, ввод Т2	45,02	151,14	105 800	700	3,35	0,28
ТП-37, ввод Т1	156,71	182,40	68 400	375	1,16	0,34
ТП-37, ввод Т2	63,24	83,20	31 200	375	1,31	0,15
КТПН-ДОЛБр	27,88	37,02	25 920	700	1,32	0,10
КТПН АБЗ ТЧЭ	67,91	126,72	23 760	187,5	1,86	0,23
КТП-630 кВА	182,46	361,28	252 900	700	1,98	0,67

Определение максимального коэффициента загрузки фидеров РЭС Чита-1.

Представленные расчеты выполнены на основе данных месячного потребления. Поэтому полученный коэффициент загрузки яв-

ляется средним. Важно оценить загрузку трансформаторных подстанций при максимальной нагрузке [6].

Для определения достоверного коэффициента такого увеличения используем данные по

**Таблица 3.** Распределение потребителей по подстанциям  
**Table 3.** Distribution of consumers among substations

Наименование тяговой подстанции Name of traction substation	Нагрузка Load
ТП-1, ввод Т1	ДСП (дежурный северного парка), учебный корпус и контора ТЧ, наружное освещение
ТП-1, ввод Т2	Водокачка ДТВ, дом отдыха локомотивной бригады, техн. библиотека, учебный корпус ТЧ, матер. склад
ТП-17, ввод Т1	«Нептун», стадион «Локомотив», Горводоканал
ТП-17, ввод Т2	Насосная ДТВ, стадион «Локомотив», спортзал
ТП-20, ввод Т1	Бассейн «Нептун», наружное освещение
ТП-28, ввод Т1	СМП-618, контора МЧ, кооператив
ТП-28, ввод Т2	Контора НГЧ, здание ДС, дефектоскопия ПЧ, здание вокзала, контра ПЧ, СМП-618, фидер УТРК (жилой сектор)
ТП-6, ввод Т2	Пескосушилка, экипировка (локомотивное депо), склад жидкого топлива, угольный склад, наружное освещение северного парка
ТП-7, ввод Т1	Компрессор ВЧДР, РЩ ВЧД № 4
ТП-7, ввод Т2	РЩ ВЧД № 1–3, горючий пост ДС (1 категории), бомбоубежище НГЧ
ТП-8, ввод Т1	«Трансконейнер»
ТП-8, ввод Т-2	«Трансконейнер»
ТП-19, ввод Т1	Трансформаторный цех, ДКЭЛ ЭЧ-1
ТП-19, ввод Т2	ВИКС, здание ЭЧ-1, трансформаторный цех, здание ДКЭЛ
ТП-23, ввод Т1	ДГС-500 (дизель-генератор)
ТП-23, ввод Т-2	Вагоны (подогрев)
ЦРП, ввод Т1	Вагонно-ремонтное депо
ЦРП, ввод Т2	
ТП-2, ввод Т1	Терапевтический корпус больницы (1 категория)
ТП-2, ввод Т2	Поликлиника, кухня, рентген-кабинет, томограф
ТП-2а, ввод Т1	Корпус № 2 больницы, терапия № 2, водокачка, отделение дороги (1 категория)
ТП-2а, ввод Т2	Наружное освещение, рентген-кабинет, терапия № 1, инженерный центр, корпус больницы № 2 (1 категория)
ТП-3, ввод 0,4	Фидера НГЧ (жилой сектор), фидер ПЧ-4, фидер «Огонек» (полиция, магазин, жилой сектор)
ТП-4, ввод Т1	Товарный двор; контейнерное депо; ДСП транзитного парка фидер; наружное освещение южного парка; кран «Трансконтейнера»
ТП-9, ввод Т1	Наружное освещение, сортировка, здание КИПа (ШЧ), грузовой двор, 6-й корпус локомотивного депо
ТП-9, ввод Т-2	Пост ЭЦ, локомотивное депо (подъемка) (резерв)
ТП-13, ввод Т1	Пожарный поезд
ТП-13, ввод Т2	Пост ЭЦ, РЦС (гарантированное питание), бомбоубежище
ТП-37, ввод Т1	Насосная, ППВ, ДОО (для ВРК-2)
ТП-37, ввод Т2	Ремонтно-механический цех, компрессорная, здание эксплуатации, насос-котел
КТП-28	Подъемка (ФПК), дефектовка колесный пар, наружное освещение Чита-2, ИП «Бурушка» (парк отдыха)
КТП-ВОХР	Здание ВОХР, наружное освещение транзитного парка
КТПН-ДОЛБр	КТПН-ТЧ (дом отдыха локомотивной бригады)
КТПН АБЗ ТЧЭ	Административный корпус локомотивного депо
КТП-630 кВА	Наружное освещение южного парка

питающим фидерам от ТП «Молодежная» на ЦРП Чита», отражающий почасовой расход электроэнергии. Например, в январе 2023 г. по фидеру ячейки 30 максимальный расход пришелся на 16 января и составил 35 757 кВт · ч., т.е. в среднем 1 489 кВт · ч. за 1 ч. При этом инструментальные замеры показали максимум нагрузки этих суток 1 868 кВт · ч. с 4 до 5 утра. Соответственно максимальная нагрузка отличается от усредненной. Обработка инструментальных замеров по другим суткам и фидерам также подтверждает значение коэффициента увеличения максимальной загрузки по сравнению с усредненной в 25–30%. В табл. 4 отобразим максимальную нагрузку за год по фидерам.

Произведем расчет на примере ячейки 30. Суммарная нагрузка за все месяцы составляет  $\Sigma_a = 7\,790\,780$  кВт · ч. Максимальное значение расхода  $P_{\max} = 2\,369$  кВт. Наибольшее потребление выпадает на январь и декабрь. Тогда:

$$P_{\text{ср}} = \frac{7790780}{8760} = 889 \text{ кВт};$$

$$K_{\text{ув}} = \frac{2369}{889} = 2,66 [7].$$

Результаты расчета по остальным ячейкам сведем в табл. 5. Выделим 2–3 месяца максимального потребления на каждую ячейку, данные внесем в табл. 6.

**Таблица 4.** Определение максимальных нагрузок за год по фидерам РЭС Чита-1

**Table 4.** Determination of maximum loads per year on feeders of the Chita-1 power grid

Месяц Month	Ячейка 30		Ячейка 23		Ячейка 10		Ячейка 32		Ячейка 2		Ячейка 5	
	Итого расход за месяц, кВт · ч	$P_{\max}$ , кВт	Итого расход за месяц, кВт · ч	$P_{\max}$ , кВт	Итого расход за месяц, кВт · ч	$P_{\max}$ , кВт	Итого расход за месяц, кВт · ч	$P_{\max}$ , кВт	Итого расход за месяц, кВт · ч	$P_{\max}$ , кВт	Итого расход за месяц, кВт · ч	$P_{\max}$ , кВт
Январь	1 016 882	1 868	521 108	1 001	0,00	0,00	330 573	987	209 555	308	118 501	269
Февраль	880 703	1 804	439 698	1 022	0,00	0,00	337 541	835	191 683	322	99 873	241
Март	794 424	1 429	406 400	798	328 758	817	11 314	481	174 972	277	78 971	184
Апрель	599 607	1 108	337 874	680	299 908	725	5 687	523	154 403	241	59 482	157
Май	378 817	930	365 902	1 641	233 440	595	0,00	0,00	140 676	219	46 394	123
Июнь	562 442	1 337	39 509	604	203 456	704	11 595	436	128 298	297	35 735	150
Июль	359 234	1246	302 378	811	148 094	639	25 756	712	87 660	193	35 296	94
Август	415 033	942	304 738	691	170 136	647	5 998	408	66 663	191	39 775	89
Сентябрь	482 866	1 188	312 343	698	180 122	670	0,00	0,00	136 266	266	37 071	119
Октябрь	596 419	1 145	489 724	1 934	137 497	657	68 242	756	199 699	301	66 570	144
Ноябрь	757 130	1 551	446 940	1 033	217 427	791	0,00	0,00	216 996	345	68 783	151
Декабрь	947 223	2 369	549 563	2 274	226 415	839	0,00	0,00	242 356	371	98 795	230
ИТОГО Total	7 790 780	–	4 516 177	–	2 145 253	–	796 706	–	1 949 227	–	785 246	–

**Таблица 5.** Определение загрузки ЦРП-Чита, ЦРП ВРД, ТП ЗаБИЖТ (итоговые показатели)

**Table 5.** Determination of the load of the CRP-Chita, CRP VRD, TP ZabIZhT (final indicators)

Показатель	Ввод ЦРП Чита-1		Ввод ЦРП – ВРД		Ввод РП ЗаБИЖТ	
	Ячейка 30	Ячейка 23	Ячейка 10	Ячейка 32	Ячейка 2	Ячейка 5
$P_{\text{ср}}$	889	515	244	91	22	90
$K_{\text{ув}}$	2,66	4,41	3,43	10,8	1,67	2,98

**Таблица 6.** Месяцы максимального потребления

**Table 6.** Months of maximum consumption

№ ячейки	Месяцы		
30	Январь (1 016 882)	Декабрь (947 223)	Февраль (880 703)
23	Декабрь (549 563)	Январь (521 108)	Ноябрь (446 940)
10	Март (328 758)	Апрель (299 908)	–
32	Февраль (337 541)	Январь (330 573)	–
2	Декабрь (242 356)	Ноябрь (216 996)	Январь (209 555)
5	Январь (118 501)	Февраль (99 873)	Декабрь (98 795)



Согласно табл. 6  $P_{\max}$  является значением почасового потребления суточного максимума. Тогда по формуле (7) [8]:

$$S_{\text{факт. макс}} = \frac{P_{\text{факт. макс}}}{\cos \varphi}, \quad (7)$$

где  $\cos \varphi = 0,85$ .

Фактический средний коэффициент загрузки трансформаторов определяется по формуле (8):

$$K_3 = \frac{S_{\text{факт. макс}}}{S_{\text{ном. т}}}, \quad (8)$$

где  $S_{\text{ном. т}}$  – номинальная мощность трансформатора, равная для ЦРП-Чита-2 – 630 кВА; ЦРП ВРД – 1560 кВА и 2 – 630 кВА; РП – ЗаБИЖТ 2·630 кВА.

Произведем расчет на примере ячейки 30. В январе 2023 г. часовой максимум составил 1 868 кВт. Номинальная мощность трансформатора  $S_{\text{ном. т}} = 630$  кВА. Тогда:

$$S_{\text{факт. макс}} = \frac{1868}{0,85} = 2197;$$

$$K_3 = \frac{2197}{630} = 3,48.$$

Коэффициент загрузки фидера – отношение рабочего тока нагрузки к номинальному току трансформатора или потребляемой мощности к номинальной мощности трансформатора – показывает, насколько эффективно трансформатор использует свои ресурсы и какую нагрузку может выдержать без перегрева или повреждения. Тем самым, чем меньше коэффициент загрузки, тем большую нагрузку можно подключить. Если  $K_3$  меньше оптимального, то потери будут больше.

В реальности  $K_3$  на многих ТП меньше 20%, так как при развитии городов старые подстанции оставались, добавляли новые, но трансформаторы не выгодно менять на новые, тем более на менее мощные (экономически не выгодно). Поэтому  $K_3$  малы, и они не являются аварийным режимом. Результаты расчета сведены в табл. 7.

Выполненный расчет показывает наличие постоянного режима перегрузки по вводам ЦРП-Чита, питаемого от ячеек 30 и 23 ТП «Молодежная». По остальным базовым ТП (ЦРП – ВРД и РП ЗаБИЖТ) ситуация удовлетворительная. Поскольку реконструкция ЦРП-Чита не меняет мощности силовых трансформаторов, необходимо рассмотреть вопрос перераспределения нагрузок, питаемых от ЦРП-Чита.

### Расчет потерь электроэнергии

Технологические потери электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям включают в себя технические потери в линиях и оборудовании электрических сетей, обусловленные физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии в соответствии с техническими характеристиками и режимами работы линий и оборудования с учетом расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций и потери, обусловленные допустимыми погрешностями системы учета электроэнергии [8].

Технологические потери электроэнергии в электрических сетях, возникающие при ее передаче, состоят из потерь, не зависящих от величины передаваемой мощности (нагрузки) – условно-постоянных потерь, и потерь, объем

Таблица 7. Коэффициент загрузки фидеров на каждый месяц

Table 7. Feeder utilisation rate for each month

Месяц	$K_3$					
	Ячейка 30	Ячейка 23	Ячейка 10	Ячейка 32	Ячейка 2	Ячейка 5
Январь	3,48	1,80	0,00	1,84	0,57	0,50
Февраль	3,36	1,90	0,00	1,55	0,60	0,45
Март	2,60	1,49	1,71	0,89	0,51	0,34
Апрель	2,06	1,26	1,52	0,97	0,45	0,29
Май	1,73	3,06	1,25	0,00	0,40	0,22
Июнь	2,49	1,12	1,47	0,81	0,55	0,28
Июль	2,32	1,51	1,34	1,32	0,36	0,17
Август	1,75	1,29	1,35	0,76	0,35	0,16
Сентябрь	2,21	1,30	1,40	0,00	0,49	0,22
Октябрь	2,13	3,61	1,38	1,41	0,56	0,26
Ноябрь	2,89	1,92	1,66	0,00	0,64	0,28
Декабрь	4,42	4,24	1,76	0,00	0,69	0,42

которых зависит от величины передаваемой мощности (нагрузки) – нагрузочных (переменных) потерь [9].

Технологические потери электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям рассчитываются за базовый (отчетный год, предшествующий году расчета) и на регулируемый периоды (год) по фактическим и прогнозным показателям баланса электроэнергии [10].

Потери, обусловленные допустимыми погрешностями системы учета, определяются в соответствии с методикой их определения. Расход электроэнергии на собственные нужды устанавливается в соответствии с приборами учета. Технологические потери электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям рассчитываются отдельно по составляющим: условно-постоянные, нагрузочные и потери, обусловленные допустимыми погрешностями системы учета [11].

Цели анализа потерь электроэнергии заключаются в выявлении зон конкретных элементов с повышенными технологическими потерями в сетях всех напряжений; оценке влияния на технологические потери основных параметров поступления и отпуска электроэнергии в сети на основе сопоставительных расчетов потерь при различных значениях параметров или по нормативной характеристике потерь; определение количественных заданий по снижению потерь для различных служб и подразделений сетевой организации.

### Расчет потерь электроэнергии в линиях

При передаче электрической энергии от электростанций до потребителя около 12–18 % всей вырабатываемой электроэнергии теряется в проводниках воздушных и кабельных линий.

Потери электроэнергии определим по (9):

$$\Delta \mathcal{E}_a = K_\phi^2 \cdot \frac{\mathcal{E}_a^2 - (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \cdot 10^{-3}}{U_{\text{ном}}^2 \cdot T_{\text{рх}}} \cdot r_0 \cdot l, \quad (9)$$

где  $K_\phi^2$  – коэффициент формы, учитывающий отличие среднеквадратичного тока от среднего, принимается равным 1,1;  $\mathcal{E}_a$  – расход активной электроэнергии по присоединению за 2023 г., кВт · ч;  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение, равное 6,3 кВ;  $T_{\text{рх}}$  – число часов работы линии в год, равное 8 760;  $r_0$  – удельное активное сопротивление одной фазы, Ом/км;  $l$  – длина линии, км;  $\operatorname{tg} \varphi = 0,6$  (при отсутствии данных).

Произведем расчет на примере ТП-1, ввод Т1. Марка провода данного присоединения СБ 3×95 мм<sup>2</sup>, длина составляет 0,2 км. Удельное активное сопротивление  $r_0 = 0,194$  Ом/км. Потребление на 2023 г. 955 060 кВт · ч. Тогда:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_a &= 1,1 \cdot \frac{955060 \cdot (1 + 0,6^2) \cdot 10^{-3}}{6,3^2 \cdot 8760} \cdot 0,194 \cdot 0,2 = \\ &= 167,51 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Результаты расчета потерь в линиях по остальным ТП сведем в табл. 8.

Оценим долю технологических потерь в линиях в общем потреблении 2023 г. по формуле (10):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л}\%} = \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{л}}}{\mathcal{E}_a} \cdot 100\%. \quad (10)$$

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л}\%} = \frac{8224,41}{11290095,03} \cdot 100\% = 0,07\%.$$

Наибольшие потери электроэнергии при расчете в кабельных и воздушных линиях получили ТП-3 ввод 0,4 кВ, ЦРП ввод Т1, ТП-4, ввод Т1, КТП 630 кВА, ТП-37 ввод Т1 и ТП-8 ввод Т1. Это объясняется либо значительной передаваемой мощностью (ЦРП, ТП-3), либо небольшим сечением линии (ТП-4), либо значимой длиной (ТП-37), либо сочетанием этих факторов (ТП-37).

### Расчет потерь электроэнергии в трансформаторах

Потери электроэнергии в сетях (включая трансформаторы) составляют в среднем 4–7 % от общего объема потребления электроэнергии предприятием и зависят от многих факторов, в частности: величины электрической нагрузки предприятия; конфигурации и разграничения общезаводских и внутрицеховых сетей, их сечения и длины; режима работы трансформаторов; значения средневзвешенного коэффициента мощности предприятия; места установки компенсационных устройств.

Потери электроэнергии в силовых трансформаторах определяются по формуле (11) [12]:

$$\Delta \mathcal{E}_t = \Delta \mathcal{E}_x + \Delta \mathcal{E}_k, \quad (11)$$

где  $\Delta \mathcal{E}_x$  – потери холостого хода, кВт · ч;  $\Delta \mathcal{E}_k$  – нагрузочные потери, кВт · ч.

Потери холостого хода определяются по формуле (12):

$$\Delta \mathcal{E}_x = (\Delta P_x + K_{\text{ин}} \cdot \Delta Q_x) \cdot T_{\text{рх}}, \quad (12)$$

где  $\Delta P_x$  – активные потери холостого хода, взятые из справочника для данного трансформатора, кВт;  $K_{ин}$  – коэффициент изменения потерь активной мощности из-за наличия реактивной. Для ТП 6-10/0,4 кВ принимается согласно [13] 0,15 кВт/кВАр;  $\Delta Q_x$  – реактивные потери холостого хода, кВАр.

Нагрузочные потери определяются по формуле (13):

$$\Delta \mathcal{E}_k = (\Delta P_k + K_{ин} \cdot \Delta Q_k) \cdot K_3^2 \cdot T_{рк}, \quad (13)$$

где  $\Delta P_k$  – активные нагрузочные потери, кВт, принимается по справочнику [14].

Таблица 8. Потери электроэнергии в линиях

Table 8. Power losses in lines

Наименование присоединения	Марка провода, длина, км	Удельное активное сопротивление, Ом/км	Потребление электроэнергии за 2023 г., кВт·ч	Потери электроэнергии, кВт
ТП-1, ввод Т1	СБ 3×95, 0,02	0,19	955 060	167,51
ТП-1, ввод Т2	СБ 3×95, 0,02	0,19	5,56	0,00
ТП-17, ввод Т1	АСБ 3×120, 0,35	0,25	197 520	16,67
ТП-17, ввод Т2	2 АСБ 3×120, 0,82	0,25	448	0,00
	СИП 3×50, 0,15	0,72		
	АС 3×70, 0,1	0,42		
	2 АСБ 3×120, 0,08	0,25		
ТП-20, ввод Т1	АСБ 3×120, 0,35	0,25	168 840	12,18
ТП-28, ввод Т1	2 АСБ 3×50, 0,4	0,62	466 075	127,49
ТП-28, ввод Т2	2 АСБ 3×50, 0,4	0,62	0	0,00
ТП-6, ввод Т2	АПвБП 3×95, 0,27	0,32	202 119	17,02
ТП-7, ввод Т1	АСБ 3×50, 0,35	0,62	356 800	130,75
ТП-7, ввод Т2	2 АСБ 3×120, 0,22	0,62	257 400	21,39
ТП-8, ввод Т1	ААБЛу 3×35, 0,4	0,89	573 360	553,92
ТП-8, ввод Т-2	2 ААБЛу 3×35, 0,48	0,89	0	0,00
ТП-19, ввод Т1	ААБ 3×120, 0,4	0,25	194 880	18,55
ТП-19, ввод Т2	АСБ 3×120, 0,38	0,25	38 880	0,70
ТП-23, ввод Т1	ААБУ 3×120, 0,16	0,25	56 880	0,63
ТП-23, ввод Т2	ААБУ 3×120, 0,16	0,25	0	0,00
ЦРП, ввод Т1	2 АСБ 3×240, 2,5	0,12	1 536 216	1801,12
ТП-2, ввод Т1	ААБ 3×70, 0,5	0,44	0	0,00
ТП-2, ввод Т2	АСБ 3×50, 0,5	0,62	207 200	62,99
ТП-2а, ввод Т1	2 АСБ 3×120, 0,55	0,25	645 760	140,03
ТП-3, ввод 0,4	АСБ 3×70, 0,8	0,44	752 911	2 255,09
	2 АСБ 3×240, 0,8	0,065		
	АС 3×35, 0,55	0,79		
ТП-4, ввод Т1	АСБ 3×50, 0,2	0,62	568 353	1017,78
	СБ 3×16, 0,2	1,15		
	АСБ 3×95, 0,2	0,32		
	СИП 3×35, 0,25	0,98		
ТП-9, ввод Т1	АСБ 3×35, 0,18	0,89	436 278	144,32
ТП-9, ввод Т-2	ААБЛу 3×120, 0,02	0,25	102 765	0,26
ТП-13, ввод Т1	ААБЛу 3×120, 0,4	0,25	378 200	69,87
ТП-13, ввод Т2	ААБЛу 3×120, 0,02	0,25	0	0,00
ТП-37, ввод Т1	ААШ 3×120, 1,2	0,25	705 200	728,73
ТП-37, ввод Т2	ААБ 3×120, 0,4	0,25	284 600	39,56
КТПН-ДОЛБр	2 ААБЛу 3×35, 0,135	0,89	234 240	15,60
КТПН АБЗ ТЧЭ	ААБЛу 3×120, 0,7	0,25		19,44
КТП-630 кВА	СБ 3×95, 0,4	0,19	1 532 700	862,81
$\Sigma \Delta \mathcal{E}_л$				8 224,41

Активные потери определяются по (14):

$$\Delta Q_k = \frac{U_k}{100} \cdot S_{\text{ном. т.}} \quad (14)$$

где  $U_k$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, % (принимается по справочнику [15]);  $\Delta Q_k$  – реактивные нагрузочные потери, кВАр;  $K_3$  – коэффициент загрузки трансформатора, у.е.

Произведем расчет на примере ТП 1, ввод Т1. Согласно справочнику [16, 17]  $\Delta P_x = 1,05$  кВт,  $\Delta Q_x = 8,4$  кВАр,  $\Delta P_k = 5,5$  кВт,  $\Delta Q_k = 18$  кВАр.

$$\Delta \mathcal{E}_x = (1,05 + 0,15 \cdot 8,4) \cdot 8760 = 20225,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\Delta \mathcal{E}_k = (5,5 + 0,15 \cdot 18) \cdot 0,334^2 \cdot 8400 = 7702,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\Delta \mathcal{E}_t = 20225,6 + 7702,6 = 27938,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Результаты расчета потерь электроэнергии в трансформаторах по остальным ТП сведены в табл. 9.

Оценим величину потерь электроэнергии в трансформаторах по отношению к общему потреблению РЭС-Чита в 2023 г. по формуле (15):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ат}\%} = \frac{\sum \Delta \mathcal{E}_{\text{ат}\%}}{\sum \mathcal{E}_a} \cdot 100\% \quad (15)$$

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ат}\%} = \frac{221977}{11290095,03} \cdot 100\% = 1,96\%.$$

### Снижение технологических потерь в линиях РЭС-Чита

На основе полученных данных по потерям в линиях РЭС-Чита (см. табл. 8) проведен анализ возможных снижений технологических потерь в линиях.

ТП-8 питается по двум вводам: первый выполнен кабелем ААБЛу 3×35 мм<sup>2</sup>, а второй – 2ААБЛу 3×35 мм<sup>2</sup>. Питание осуществляется по вводу с одним кабелем, где годовые потери со-

Таблица 9. Потери электроэнергии в трансформаторах  
Table 9. Power losses in transformers

Наименование тяговой подстанции	$S_{\text{ном}}$ , кВА	$\Delta P_x$ , кВт	$\Delta Q_x$ , кВАр	$\Delta P_k$ , кВт	$U_k$ , %	$\Delta Q_k$ , кВАр	$K_3$ , у.е.	$T_{\text{рк}}$ , ч	$\Delta \mathcal{E}_x$ , кВт·ч	$\Delta \mathcal{E}_k$ , кВт·ч	$\Delta \mathcal{E}_t$ , кВт·ч
ТП-1, ввод Т1	400	1,05	8,4	5,5	4,5	18	0,33	8 400	20 225,60	7 702,62	27 938,21
ТП-1, ввод Т2	630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,00	8 400	30 222,00	0,00	30 222
ТП-17, ввод Т1	250	0,82	5,8	3,7	4,5	11,25	0,26	4 500	14 804,40	1 623,55	16 427,94
ТП-20, ввод Т1	250	0,82	5,8	3,7	4,5	11,25	0,18	4 500	14 804,40	755,80	15 560,20
ТП-28, ввод Т1	630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,19	4 500	30 222,00	2 154,30	32 376,29
ТП-28, ввод Т2	560	2,5	33,6	9,4	5,5	30,8	0,00	4 500	66 050,40	0,00	66 050,40
ТП-6, ввод Т2	400	1,05	8,4	5,5	4,5	18	0,26	2 250	20 225,60	1 287,93	21 513,53
ТП-7, ввод Т1	2×400	1,05	8,4	5,5	4,5	18	0,20	4 500	20 225,60	1 486,63	21 712,23
ТП-8, ввод Т1	400	1,05	8,4	5,5	4,5	18	0,20	8 400	20 225,60	2 776,08	23 001,68
ТП-8, ввод Т-2	630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,00	8 400	30 222,00	0,00	30 222
ТП-19, ввод Т1	2×400	1,05	8,4	5,5	4,5	18	0,05	2 250	20 225,60	47,66	20 273,26
ТП-23, ввод Т1	250	0,82	5,8	3,7	4,5	11,25	0,12	2 250	14 804,40	171,56	14 975,96
ТП-23, ввод Т2	630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,00	8 400	30 222,00	0,00	30 222
ЦРП, ввод Т1	2×630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,64	4 500	30 222,00	23 404,47	53 626,47
ТП-2, ввод Т1	400	1,05	8,4	5,5	4,5	18	0,00	8 400	20 225,60	0,00	20 225,60
ТП-2, ввод Т2	250	0,82	5,8	3,7	4,5	11,25	0,43	2 250	14 804,40	2 276,49	17 080,89
ТП-2а, ввод Т1	2×630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,14	8 400	30 222,00	2 215,49	32 437,49
ТП-3, ввод 0,4	250	0,82	5,8	3,7	4,5	11,25	0,42	8 400	14 804,40	8 051,52	22 855,92
ТП-4, ввод Т1	250	0,82	5,8	3,7	4,5	11,25	0,32	8 400	14 804,40	4 588,04	19 392,44
ТП-9, ввод Т1	400	1,05	8,4	5,5	4,5	18	0,29	4 500	20 225,60	3 000,35	23 225,95
ТП-9, ввод Т-2	250	0,82	5,8	3,7	4,5	11,25	0,06	8 400	14 804,40	150,00	14 954,40
ТП-13, ввод Т2	2×630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,08	8 400	30 222,00	759,92	30 981,92
ТП-37, ввод Т1	630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,29	4 500	30 222,00	4 931,95	35 153,95
ТП-37, ввод Т2	630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,12	4 500	30 222,00	803,27	31 025,27
КТПН-ДОЛБр	400	1,05	8,4	5,5	4,5	18	0,08	8 400	20 225,60	463,34	20 688,94
КТПН. АБЗ ТЧЭ	2×630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,13	2 250	30 222,00	463,10	30 685,10
КТП-630 кВА	630	1,56	12,6	7,6	5,5	34,65	0,34	8 400	30 222,00	12 480,30	42 702,30
$\Sigma \Delta \mathcal{E}_t$											767 035,26

ставили 553,92 кВт · ч. При переключении питания ТП-8 на второй ввод с двумя кабелями потери снизятся вдвое за счет снижения сопротивления эквивалентного кабеля. Уменьшение потерь на год составит  $553,92/2 = 276,96$  кВт · ч.

Питание ТП-4 осуществляется по сложной линии из четырех участков с тремя разными марками кабелей, в том числе СБ  $3 \times 16$  мм<sup>2</sup> и участком ВЛ. Удельное сопротивление кабеля такого сечения достаточно большое – 1,15 Ом/км, соответственно годовые потери в нем:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л тп-4}} = 1,1^2 \cdot \frac{568333^2 \cdot (1 + 0,6^2) \cdot 10^{-3}}{6,3^2 \cdot 8760} \cdot 1,15 \cdot 0,2 = 351,64 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Предлагается при возможности заменить этот кабель на АСБ  $3 \times 50$  мм<sup>2</sup> с удельным сопротивлением 0,62 Ом/км. Тогда потери на этом участке составят:

$$\Delta \mathcal{E}'_{\text{л тп-4}} = 1,1^2 \cdot \frac{568333^2 \cdot (1 + 0,6^2) \cdot 10^{-3}}{6,3^2 \cdot 8760} \cdot 0,62 \cdot 0,2 = 189,58 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Сокращение потерь в год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л тп-4}} - \Delta \mathcal{E}'_{\text{л тп-4}} = 351,64 - 189,58 = 162,06 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

На линии, питающей ТП-3 имеется участок, выполненный проводом АС  $3 \times 35$  мм<sup>2</sup>. Годовые потери по этому участку составят:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л тп-3}} = 1,1^2 \cdot \frac{752911^2 \cdot (1 + 0,6^2) \cdot 10^{-3}}{6,3^2 \cdot 8760} \cdot 0,79 \cdot 0,55 = 1165,78 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

При замене этого провода на АС  $3 \times 70$  мм<sup>2</sup> с удельным сопротивлением 0,43 Ом/км потери составят:

$$\Delta \mathcal{E}'_{\text{л тп-3}} = 1,1^2 \cdot \frac{752911^2 \cdot (1 + 0,6^2) \cdot 10^{-3}}{6,3^2 \cdot 8760} \cdot 0,43 \cdot 0,55 = 634,54 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Сокращение потерь в год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л тп-3}} - \Delta \mathcal{E}'_{\text{л тп-3}} = 1165,78 - 634,54 = 531,24 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Сокращение потерь в линиях, питающие двухтрансформаторные подстанции, также будет проходить при выводе одного из них в резерв.

Оценим снижение потерь от предлагаемых мероприятий по формуле (16):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{л тп-8}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{л тп-4}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{л тп-3}}. \quad (16)$$

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л}} = 276,96 + 189,58 + 634,54 = 1101,08 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

В относительных единицах снижение потерь определим по формуле (17):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л} \%} = \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{л}}}{\sum \Delta \mathcal{E}_{\text{л}}} \cdot 100\%. \quad (17)$$

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л} \%} = \frac{1101,08}{8224,41} \cdot 100\% = 13,38\%.$$

### Снижение технологических потерь в трансформаторах РЭС-Чита

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшие потери электроэнергии приходят на трансформаторы с наибольшей передаваемой мощностью (ТП-28, ЦРП, ТП-2а, ТП-37, КТП-630) и наибольшей нагрузкой (ЦРП). При этом имеется значимая группа двухтрансформаторных подстанций, работающих на одном трансформаторе. Второй включен и находится в резерве, что дает большие потери электроэнергии. Согласно табл. 9 к таким ТП относятся: ТП-28, ТП-8, ТП-1, ТП-19, ТП-23, ТП-2а, ТП-9, ТП-13. Оценим сокращение величины потерь в этих ТП в случае отключения одного из трансформаторов в 2023 г по формуле (18):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{сокр.}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{ТП-28}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ТП-8}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ТП-1}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ТП-19}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ТП-23}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ТП-2а}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ТП-9}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ТП-13}}. \quad (18)$$

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{сокр.}} = 66050 + 30222 + 30222 + 20225 + 30222 + 15111 + 14804 + 15111 = 221977 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Сокращение величин потерь электроэнергии в 2023 г. в относительных единицах составит:

$$\frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{сокр.}}}{\Delta \mathcal{E}_{\text{т}\Sigma}} \cdot 100\%,$$

где  $\Delta \mathcal{E}_{\text{т}\Sigma}$  – суммарные потери электроэнергии по всем ТП за 2023 г., кВт · ч.

$$\frac{221977}{767035,3} \cdot 100\% = 28,93\%.$$

В денежном эквиваленте это составляет:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ден}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{сокр.}} \cdot T_{6,3},$$

где  $\Delta \mathcal{E}_{\text{ден}}$  – стоимость потерь в денежном эквиваленте;  $T_{6,3}$  – действующий тариф на 6,3 кВт.

Таким образом, данное мероприятие позволяет весьма значительно снизить величину тех-

нологических потерь по РЭС-Чита за счет потерь холостого хода трансформаторов.

Решение вопроса о замене силовых трансформаторов на малозагруженных подстанциях на менее мощные предлагается осуществлять после определения оптимального коэффициента загрузки этих трансформаторов и сравнения его с фактическим.

Дело в том, что при уменьшении мощности силового трансформатора его потери холостого хода уменьшаются, но при этом нелинейно (из-за коэффициента загрузки) возрастают нагрузочные потери. Оптимальный коэффициент загрузки как раз соответствует минимуму суммарных потерь электроэнергии. Согласно [18, 19], в условиях эксплуатации оптимальным коэффициентом загрузки считается такой, который обеспечивает максимальный приведенный коэффициент полезного действия, соответствующий формуле (19):

$$K_{30} = \sqrt{\frac{\Delta P'_x}{\Delta P'_k}}, \quad (19)$$

где  $\Delta P'_x$  – холостой ход, кВт;  $\Delta P'_k$  – нагрузочные потери, кВт.

Потери холостого хода определим по формуле (20):

$$\Delta P'_x = \Delta P_x + K_{ин} \cdot Q_x \quad (20)$$

Нагрузочные потери определим по (21):

$$\Delta P'_k = \Delta P_k + K_{ин} \cdot Q_k \quad (21)$$

Данные для расчета  $\Delta P'_x$  и  $\Delta P'_k$  возьмем из табл. 9.

Рассчитаем эти величины на примере ТП-20.

$$\Delta P'_x = 0,82 + 0,15 \cdot 5,8 = 1,69 \text{ кВт};$$

$$\Delta P'_k = 3,7 + 0,15 \cdot 11,2 = 5,38 \text{ кВт}.$$

$$K_{30} = \sqrt{\frac{1,69}{5,38}} = 0,56.$$

Аналогичный расчет по остальным малозагруженным ТП сведем в табл. 10.

Сопоставление оптимального и фактического коэффициентов загрузки рассматриваемых подстанций показывает целесообразность их замены на менее мощные при их плановом или внеплановом перевооружении в рамках реконструкции (модернизации) (см. табл. 10).

### Заключение

В целях повышения надежности системы и снижения технологических потерь электроэнергии определены основные показатели работы схемы электроснабжения РЭС-Чита: годовое потребление, потери электроэнергии в линиях и трансформаторах. Установлен фактический средний, максимальный и оптимальный коэффициент загрузки трансформаторов каждой ТП. На этой основе были разработаны мероприятия по снижению технологических потерь электроэнергии.

**Таблица 10.** Оптимальный коэффициент загрузки силовых трансформаторов

**Table 10.** Optimal load factor of power transformers

Наименование тяговой подстанции Name of traction substation	$S_{ном}$	$\Delta P'_x$	$\Delta P'_k$	$K_{30}$	$K_{з \text{ факт}}$	Предлагаемая замена, кВА Suggested replacement, kVA
ТП-20	250	1,69	5,38	0,56	0,17	100
ТП-28 T1	630	3,45	12,79	0,51	0,19	250
ТП-28 T2	560	7,54	14,02	0,73	0,00	250
ТП-7	2×400	2,31	8,2	0,53	0,20	2×250
ТП-8 T1	400	2,31	8,2	0,53	0,20	250
ТП-8 T2	630	3,45	12,79	0,51	0,00	250
ТП-19 T1	2×400	2,31	8,2	0,53	0,05	250
ТП-19 T2		2,31	8,2	0,53	0,25	250
ТП-23 T1	250	1,69	5,38	0,56	0,11	100
ТП-23 T2	630	3,45	12,79	0,51	0,00	100
ТП-2а	2×630	3,45	12,7975	0,51	0,14	2×250
ТП-9 T1	400	2,31	8,2	0,53	0,28	250
ТП-13 T2	2×630	3,45	12,7975	0,51	0,08	2×100
ТП-37 T1	2×630	3,45	12,7975	0,51	0,29	2×250
ТП-37 T2		3,45	12,7975	0,51	0,11	
КТПН-ДОЛЬр	400	2,31	8,2	0,53	0,08	100

В линиях:

1. При переключении питания ТП-8 на второй ввод с двумя кабелями, потери снизятся вдвое за счет снижения сопротивления эквивалентного кабеля, уменьшение потерь на год составит 276,96 кВт·ч.

2. При замене кабеля на ТП-4 с СБ 3×16 мм<sup>2</sup> на АСБ 3×50 мм<sup>2</sup> с удельным сопротивлением 0,62 Ом/км, сокращение потерь в год составит 162,06 кВт.

3. При замене кабеля на ТП-3 с АС 3×35 мм<sup>2</sup> на АС 3×70 мм<sup>2</sup> с удельным сопротивлением 0,43 Ом/км, сокращение потерь в год составит 531,24 кВт.

4. Сокращение потерь в линиях, питающих двухтрансформаторные подстанции, будет проходить при выводе одного из них в резерв. Данные мероприятия позволят снизить величину технологических потерь в линиях с 25,18 % до 13,38 %.

В трансформаторах:

1. Есть значительная группа двухтрансформаторных подстанций, работающих на одном трансформаторе, у которых второй включен и находится в резерве. В случае отключения одного из трансформаторов за счет потерь холостого хода возможно снизить величину технологических потерь на РЭС-Чита. К таким двухтрансформаторным подстанциям относятся: ТП-28, ТП-8, ТП-1, ТП-19, ТП-23, ТП-2а, ТП-9, ТП-13.

2. Предлагаются замены силовых трансформаторов на малозагруженных подстанциях на менее мощные: ТП-20 (с 250 на 100 кВА); ТП-28 Т1 (с 630 на 250 кВА) и ТП-28 Т2 (с 560 на 250 кВА); ТП-7 (с 2×400 на 2×250 кВА); ТП-8 Т1 (с 400 на 250 кВА) и ТП-8 Т2 (с 630 на 250 кВА); ТП-19 (с 2×400 на 2×250 кВА); ТП-23 Т1 (с 250 на 100 кВА) и ТП-23 Т2 (с 630 на 100 кВА); ТП-2а (с 2×630 на 2×250 кВА); ТП-9 Т1 (с 400 на 250 кВА); ТП-13 (с 2×630 на 2×100 кВА); ТП-37 (с 2×630 на 2×250 кВА); КТПН-ДОЛБр (с 400 на 100 кВА).

#### Список литературы

1. Фоков К.И., Твердохлебов И.А., Григорьев Н.П. Выбор проектных решений при разработке подстанции 10–500 кВ. Хабаровск : ДВГУПС, 2001. 53 с.
2. Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям : приказ Минэнерго России № 326 от 30.12.2008 (ред. 01.02.2010). Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
3. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях : Руководство для практических расчетов. М. : Энергоатомиздат, 1989. 176 с.
4. Об утверждении аннотированного перечня действующих нормативных материалов для нормирования труда в подразделениях филиалов ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» №513/р от 02.03.2022. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
5. Об утверждении глав правил устройства электроустановок : приказ Минэнерго России № 204 от 08.07.2002. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
6. Чекулаев В.Е., Горожанкина Е.Н., Лелеха В.В. Охрана труда и электробезопасность. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2012. 304 с.
7. Петров Е.Б. Электрические подстанции. М. : Маршрут, 2004. 246 с.
8. Ристхейн Э.М. Электроснабжение промышленных установок. М. : Энергоатомиздат, 1991. 423 с.
9. Поплавский А.Н., Краснов Б.Д., Недачин В.В. Стационарная электроэнергетика железнодорожного узла. М. : Транспорт, 1986. 279 с.
10. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера. М. : Энергия, 1980. 456 с.
11. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М. : ЭНАС, 2009. 456 с.
12. Грунин О.М., Филиппов С.А. Электрические сети и системы в примерах и задачах. Чита : ЗАБИЖТ, 2010. 251 с.
13. Энергосбережение и повышение эффективности использования энергоресурсов в зданиях и сооружениях / А.П. Баскаков, Н.И. Данилов, С.Е. Щеклеин и др. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2002. 326 с.
14. Ратнер М.П., Могилевский Е.Л. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. М. : Транспорт, 1985. 295 с.
15. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
16. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России № 250 от 23.06.2022. Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
17. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М. : Стандартинформ, 2014. 19 с.
18. СТО 34.01-3.2-011-2021. Трансформаторы силовые распределительные 6-10 кВ мощностью 63-2500 кВА. Требования к уровню потерь холостого хода и короткого замыкания. Введ. 2021–06–21. М. : ПАО «Россети», 2021. 10 с.
19. Фролов А.В., Бакаева Т.Н. Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда. Ростов н/Д. : Феникс, 2008. 750 с.

## References

1. Fokov K.I., Tverdokhlebov I.A., Grigor'ev N.P. Vybor proektnykh reshenii pri razrabotke podstantsii 10–500 kV [The choice of design solutions for the development of a 10-500 kV substation]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2001. 53 p.
2. Prikaz Minenergo Rossii № 326 ot 30.12.2008 «Ob organizatsii v Ministerstve energetiki Rossiiskoi Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tekhnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam» (red. 01.02.2010) [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No 326 dated December 30, 2008 «On the organization in the Ministry of Energy of the Russian Federation of work on the approval of standards for technological losses of electricity during its transmission through electric networks» (ed. February 1, 2010)].
3. Zhelezko Yu.S. Vybor meropriyatii po snizheniyu poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh : Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [The choice of measures to reduce electricity losses in electric networks: A guide for practical calculations]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 176 p.
4. Rasporyazhenie OAO «RZhD» №513/r ot 02.03.2022 «Ob utverzhdenii annotirovannogo perechnya deistvuyushchikh normativnykh materialov dlya normirovaniya truda v podrazdeleniyakh filialov OAO «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» No 513/r dated March 2, 2022 «On approval of the annotated list of current regulatory materials for labor rationing in the divisions of branches of JSC "Russian Railways»].
5. Prikaz Minenergo Rossii № 204 ot 08.07.2002 «Ob utverzhdenii glav pravil ustroystva elektroustanovok» [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No 204 dated July 08, 2002 «On approval of the chapters of the rules for the installation of electrical installations»].
6. Chekulaev V.E., Gorozhankina E.N., Lepekha V.V. Okhrana truda i elektrobezopasnost' [Labour protection and electrical safety]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2012. 304 p.
7. Petrov. E.B. Elektricheskie podstantsii [Electric substations]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 246 p.
8. Ristkhein E.M. Elektrosnabzhenie promyshlennykh ustanovok [Electric power supply of industrial installations]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991. 423 p.
9. Poplavskii A.N., Krasnov B.D., Nedachin V.V. Statsionarnaya elektroenergetika zheleznodorozhnogo uzla [Stationary electric power engineering of a railway junction]. Moscow: Transport Publ., 1986. 279 p.
10. Spravochnik po proektirovaniyu elektrosnabzheniya [Handbook of power supply design]. Ed. by Krupovich V.I., Barybin Yu.G., Samover M.L. Moscow: Energia Publ., 1980. 456 p.
11. Zhelezko Yu.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii. Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Power losses. Reactive power. The quality of electricity. A guide for practical calculations]. Moscow: ENAS Publ., 2009. 456 p.
12. Grunin O.M., Filippov S.A. Elektricheskie seti i sistemy v primerakh i zadachakh [Electric Networks and Systems in Examples and Tasks]. Chita: ZABIZHT Publ., 2010. 251 p.
13. Baskakov A.P., Danilov N.I., Shcheklein S.E. et al. Energoberezhenie i povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya energoresursov v zdaniyakh i sooruzheniyakh [Energy saving and increasing the efficiency of energy resources use in buildings and structures]. Ekaterinburg: UGTU-UI Publ., 2002. 326 p.
14. Ratner M.P., Mogilevskii E.L. Elektrosnabzhenie netyagovykh potrebitelei zheleznykh dorog [Electricity supply of non-traction railway consumers]. Moscow: Transport Publ., 1985. 295 p.
15. Marquardt K.G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Power supply of electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1982. 528 p.
16. Prikaz Mintransa Rossii № 250 ot 23.06.2022 «Ob utverzhdenii 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»].
17. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [State Standard 32144-2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. Introduction]. Moscow : Standartinform Publ., 2014. 19 p.
18. STO 34.01-3.2-011-2021. Transformatory silovye raspredelitel'nye 6-10 kV moshchnost'yu 63-2500 kVA. Trebovaniya k urovnyu poter' kholostogo khoda i korotkogo замыкания [Standard of Organization 34.01-3.2-011-2021. Power distribution transformers 6–10 kV with a capacity of 63–2500 kVA. Requirements for the level of no-load and short-circuit losses]. Moscow: PAO Rosseti Publ., 2021. 10 p.
19. Frolov A.V., Bakaeva T.N. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Okhrana truda [Life safety. Labor protection]. Rostov-on-Don: Feniks Publ., 2008. 750 p.

## Информация об авторах

*Елпашев Сергей Юрьевич*, старший преподаватель кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; e-mail: elkka64@mail.ru.

## Information about the authors

*Sergei Yu. Elpashev*, Assistant Professor of the Department of Electrical Supply, Transbaikal Institute of Railway Transport – Branch of Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: elkka64@mail.ru.



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

**№ 2 (82)**  
**2 0 2 4**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **Ю.А. Трофимов**  
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

Подписано в печать 26.08.2024. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 29.08.2024

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,53.

Уч.-изд. л. 13,28. Тираж 500 экз. Заказ № 3722

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)