

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  
советах Высшей аттестационной комиссии  
Министерства образования и науки РФ

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



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

Подписной индекс  
в каталоге «Урал-Пресс» – 64556

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

Современные технологии.  
Системный анализ. Моделирование

Modern technologies.  
System analysis. Modeling

2025 № 3(87)

ISSN 1813-9108 (Print)

# Современные технологии системный анализ Моделирование

2025  
№ 3 (87)

Иркутский государственный  
университет путей сообщения

Машиностроение • Транспортные системы • Информационные технологии

Machine Building • Transport Systems • Information Technology



# Modern technologies system analysis Modeling

2025  
No. 3 (87)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

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

**№3 (87)**  
**2 0 2 5**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **Ю.А. Трофимов**  
Ответственный за выпуск **И.Ю. Ермоленко**

#### Приоритетные цели журнала

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

#### Стратегические задачи

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

#### Учредитель и издатель

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

#### Главный редактор

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)

И.Ю. Ермоленко, канд. техн. наук, доц., 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, проф., 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. Решетнёва (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, Россия, 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)  
2025  
No. 3 (87)  
Founded in 2004  
Published quarterly

**Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie**

## Aims and Scope

- transfer of knowledge and experience gained by the world community and schools of thought of the university;
- development of new knowledge in the field of mechanics; mechanical engineering; computer science; transport to solve topical problems of modern technology;
- acquaint the readers with the world's best practices in the implementation of scientific developments in technical sciences.

## 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)

**I.Yu. Ermolenko**, 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, Prof., 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)

**Адрес редакции:** 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russia 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 ПИ № ФС77-66109 от June 20, 2016

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

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

The journal is included in the list of leading scholarly journals

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

- Mechanical engineering;
- Transport systems.

## СОДЕРЖАНИЕ

## Транспортные системы

<b>Добрынин Е.В., Гаранин М.А., Плохов Е.М., Скольский А.В.</b> Моделирование переходных процессов в тяговой сети при проходе секционного изолятора .....	10
<b>Сайдова А.В., Федорова В.И., Комарова А.Н., Семенова А.С.</b> Влияние статической осевой нагрузки высокоскоростных электропоездов на силы, возникающие в системе «колесо – рельс» .....	20
<b>Куценко С.М., Чинаров Д.С.</b> Проблемы организации радиотракта на участке высокоскоростной железнодорожной магистрали .....	31
<b>Макаренко Ю.Н., Пузина Е.Ю.</b> Разработка мероприятий по поддержанию необходимого уровня напряжения в контактной сети грузонапряженного участка Восточного полигона .....	40
<b>Ковенькин Д.А., Туманов Д.О., Ходырев Ю.А.</b> Определение расчетной толщины теплоизоляции из золошлаковых отходов .....	53
<b>Ким К.К., Королева Е.Б., Михайлов М.В., Монастырский Д.Я.</b> Нетрадиционный способ заряда бортовой аккумуляторной батареи мультикоптера .....	64
<b>Белоголов Ю.И., Малова М.В.</b> Усиление технического оснащения четной системы железнодорожной станции как ключевой фактор прироста пропускных и перерабатывающих мощностей Восточного полигона .....	72
<b>Оленцевич В.А.</b> Исследование действующей технологии разработки и корректировки планов формирования поездов на железных дорогах Монголии .....	82

**Информационные технологии**

Трофимов И.Л., Кустова Е.М., Бараш С.М., Буряк А.В., Филатова В.Н. Роль библиотек в эпоху искусственного интеллекта: аналитический взгляд на новые ИИ-технологии и их применение .....	94
---	----

## CONTENTS

### Transport Systems

<b>Dobrynin E.V., Garanin M.A., Plokhov E.M., Skol'skii A.V.</b> Simulation of transients in a traction network during passage of a sectional insulator .....	10
<b>Saidova A.V., Fedorova V.I., Komarova A.N., Semenova A.S.</b> The influence of static axial load of high-speed electric trains on the forces generated in the wheel–rail system .....	20
<b>Kutsenko S.M., Chinarov D.S.</b> Problems of organizing of a radiotrack on a section of a high-speed railway line .....	31
<b>Makarenko Yu.N., Puzina E.Yu.</b> Development of measures to maintain the required voltage level in the contact network of the freight-intensive section of the Eastern polygon .....	40
<b>Koven'kin D.A., Tumanov D.O., Khodyrev Yu.A.</b> Determination of the calculated thickness of thermal insulation made of ash and slag waste .....	53
<b>Kim K.K., Koroleva E.B., Mikhailov M.V., Monastyrskii D.Ya.</b> An unconventional way to charge the onboard battery of a multicopter .....	64
<b>Belogolov Yu. I., Malova M.V.</b> Strengthening the technical equipment of the even-numbered railway station system as a key factor in increasing the throughput and processing capacities of the Eastern polygon .....	72
<b>Olentsevich V.A.</b> Research on the current technology of developing and adjusting train formation plans on the Mongolian railways .....	82

**Information Technology**

<b>Trofimov I.L., Kustova E.M., Barash S.M., Buryak A.V., Filatova V.N.</b> The role of libraries in the age of artificial intelligence: an analytical look at emerging AI technologies and their applications .....	94
--	----



## 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 (210х297 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: <http://stsam.ircups.ru> (<http://ojs.ircups.ru/index.php/stsam>)

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

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

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

Иркутский государственный университет путей сообщения. Аудитория В-203. Каимов Евгений Витальевич.

Телефон: 8(3952) 63-83-57. Факс: 8(3952) 38-76-72. E-mail: [stsam@ircups.ru](mailto:stsam@ircups.ru)

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ**

**TRANSPORT SYSTEMS**

## Моделирование переходных процессов в тяговой сети при проходе секционного изолятора

Е.В. Добрынин, М.А. Гаранин, Е.М. Плохов, А.В. Скольский✉

Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Российская Федерация

✉a.skolski@samgups.ru

### Резюме

Возникновение отказов в контактной сети, связанных с повреждением секционных изоляторов, является недопустимым, но все же остается актуальной проблемой на данный момент. Повреждения изоляторов разделяются на механические и электрические. Первые появляются в результате удара токоприемника электроподвижного состава о тело секционного изолятора, вторые – вследствие коммутаций, формирующихся в контактной сети при проходе электроподвижного состава под секционным изолятором. В данной статье авторами рассматриваются переходные процессы, возникающие в тяговой сети постоянного тока при проходе токоприемника электроподвижного состава под секционным изолятором. Составлены схема замещения схемы питания участка тяговой сети и уравнения, описывающие фазу прохождения электровоза секционного изолятора. Построена математическая модель, учитывающая токовую нагрузку электроподвижного состава, скорость его движения и тяговую характеристику. Математическая модель состоит из двух частей. В первой электровоз рассматривается как источник тока, во второй модели описывается электромеханическая схема электроподвижного состава и его движение. Рассчитана энергия дуги, которая появляется на секционном изоляторе, определена ее зависимость от скорости электроподвижного состава и величины потребляемого тока. Предложен способ, позволяющий снизить негативное влияние переходных процессов на элементы контактной сети и, соответственно, повысить надежность и безопасность системы. Результаты исследования будут полезны при разработке систем автоматизированного управления движением электроподвижных составов при переходах между секциями контактной сети.

### Ключевые слова

контактная сеть, секционный изолятор, токоприемник, переходные процессы, математическая модель, автоведение, электроподвижной состав

### Для цитирования

Моделирование переходных процессов в тяговой сети при проходе секционного изолятора / Е.В. Добрынин, М.А. Гаранин, Е.М. Плохов, А.В. Скольский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 10–19. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).10-19.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 30.05.2025 г.; поступила после рецензирования: 04.09.2025 г.; принята к публикации 05.09.2025 г.

## Simulation of transients in a traction network during passage of a sectional insulator

E.V. Dobrynin, M.A. Garanin, E.M. Plokhov, A.V. Skol'skii✉

Volga State Transport University, Samara, the Russian Federation

✉a.skolski@samgups.ru

### Abstract

Overhead contact network failures due to damaged sectional insulators are unacceptable, yet remain a pressing issue. Insulator damage is divided into mechanical and electrical. Mechanical failures occur when the rolling stock pantograph strikes the sectional insulator, while electrical failures result from switching events occurring in the overhead contact system when the rolling stock passes under the sectional insulator. In this article, the authors examine transient processes occurring in a DC traction network when the rolling stock pantograph passes under the sectional insulator. An equivalent circuit diagram for the power supply circuit of a section of the traction network and equations describing the phase of an electric locomotive's passage through the sectional insulator have been compiled. A mathematical model is constructed that takes into account the rolling stock current load, its speed, and traction characteristics. The mathematical model consists of two parts. The first considers the electric locomotive as a current source, while the second model describes the electromechanical circuit of the electric rolling stock and its motion. The arc energy generated on the section insulator is calculated, and its dependence on the rolling stock speed and the current consumption is determined. A method is proposed to reduce the negative impact of transient processes on overhead contact network components, thereby increasing the system's reliability and safety. The research results will be useful in developing automated control systems for electric rolling stock movements between overhead contact system sections.

**Keywords**

contact network, sectional insulator, pantograph, transients, mathematical model, auto guidance, electric rolling stock

**For citation**

Dobrynin E.V., Garanin M.A., Plokhov E.M., Skol'skii A.V. Modelirovanie perehodnykh processov v tyagovoi seti pri prokhode sektionnogo izolyatora [Simulation of transients in a traction network during passage of a sectional insulator]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. № 3(87). Pp. 10–19. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).10-19.

**Article Info**

Received: May 30, 2025; Revised: September 4, 2025; Accepted: September 5, 2025.

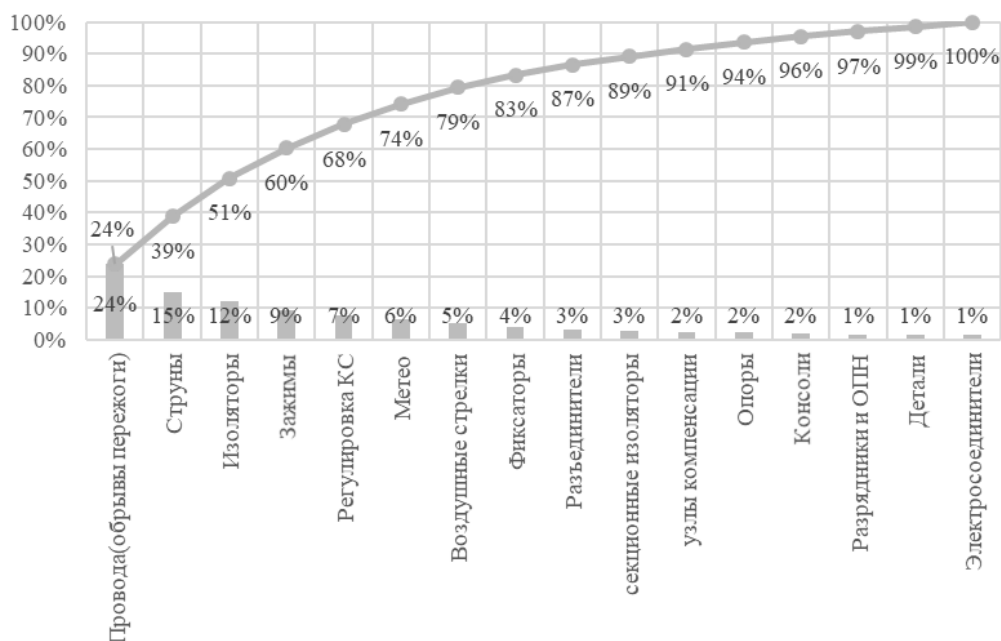
**Введение**

Работу электроподвижного состава (ЭПС) невозможно представить без контактной сети, основной частью которой является контактная подвеска. Главной задачей контактной подвески является обеспечение надежного и непрерывного токосъема с причинением минимального ущерба контактному проводу, токоприемнику электроподвижного состава и другим элементам инфраструктуры. Для качественного токосъема при движении поезда должны быть исключены все разрывы между токоприемником и контактным проводом, а также все удары токоприемника о контактную сеть, возникающие из-за разницы в эластичности в контактной подвеске. Помимо механических повреждений недопустимо электромагнитное влияние на сторонние устройства, возникающее вследствие появления электрической дуги при движении ЭПС [1, 2]. К факторам, ухудшающим качество токосъема, можно отне-

сти отрывы токоприемника от контактного провода из-за разницы в эластичности контактной подвески, колебания ЭПС при движении, возникающие вследствие неравномерной структуры железнодорожных путей, высокое значение потребляемого тока, использование нескольких токоприемников [3].

Анализ причин отказов контактной сети (рис. 1) показывает, что основными причинами нарушения нормальной работы являются обрывы и пережоги проводов контактной сети (24 % от количества отказов).

Можно отметить, что значительная часть отказов приходится на секционные изоляторы (СИ) – 20 в год [4]. Излом секционных изоляторов приводит к экономическим потерям, связанным с устранением повреждений и задержкой в движении поездов. Повреждение СИ влияет и на безопасность персонала при выполнении работ. Таким образом, проблема эксплуа-



**Рис. 1.** Статистический анализ причин отказов контактной сети за 2022 г.

**Fig. 1.** Statistical analysis of the causes of contact network failures in 2022

тации СИ является актуальной. Приобретение новых СИ связано с большими капиталовложениями, поэтому перспективным направлением можно считать совершенствование правил прохода электроподвижного состава под СИ.

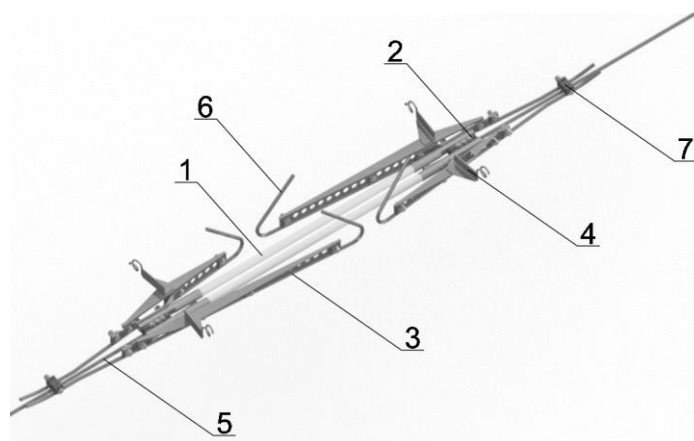
Для повышения надежности работы контактной сети, а также для удобства ее обслуживания контактная сеть разделяется на секции. Каждая секция имеет свой фидер, что позволяет выводить в ремонт отдельные участки, не нарушая работу других секций, а также передавать питание на секции от других тяговых подстанций. Электрическое разделение секций осуществляется за счет СИ, встраиваемого в контактную сеть. СИ состоит из изолирующей детали, присоединяемой к контактному проводу с помощью металлических оконцевателей, боковых скользунов и дугогасительного устройства, работающего по принципу удлинения дуги через дугогасительные рога (рис. 2). Помимо электрической прочности СИ должен обладать и механической прочностью, позволяющей выдерживать натяжение контактной подвески и нажатие токоприемника на СИ.

Отличительная особенность заключается в возможности прохождения ЭПС с поднятым токоприемником по СИ. При проходе по СИ полз токоприемника ЭПС попадает на боковые скользуны. За счет смещенного расположения воздушных промежутков между скользунами токоприемник на протяжении всего СИ остается в соприкосновении минимум с одним из скользунов. Данная конструкция позволяет обеспечить

непрерывное электроснабжение ЭПС. Проход токоприемника по СИ должен обеспечиваться как при низких скоростях, так и при организации скоростного движения, для чего конструкцию его совершенствуют и максимально облегчают, сохраняя прочностные характеристики [5–7].

При проходе токоприемника по СИ за счет разности в характеристиках жесткости контактного провода и СИ происходит удар токоприемника о СИ. Ударные воздействия на протяжении длительного времени приводят к ухудшению токосъема, а также к повреждениям СИ и токоприемника [8].

Помимо механических повреждений при проходе токоприемника могут возникать кратковременные электрические дуги разных мощностей. Дуги малых мощностей формируются при резком возрастании нагрузки на контактных вставках токоприемника, что происходит при уменьшении числа вставок, контактирующих со скользуном, вследствие попадания токоприемника в воздушный промежуток между скользунами. Дуги высоких мощностей возникают при замыкании токоприемником различных скользунов при проходе ЭПС на нейтральные вставки или отключенные секции контактной сети. Дуги высоких мощностей гасятся на рогах токоприемника. Электрические дуги появляются при условии работы ЭПС с полной нагрузкой [8]. Целью данной статьи является представление результатов факторного анализа негативного воздействия на СИ электрических процессов, возникающих при проходе его ЭПС.



**Рис. 2.** Внешний вид секционного изолятора:

1 – изолирующие стержневые элементы; 2 – монтажная плата; 3 – боковой скользящий; 4 – подвесной кронштейн; 5 – контактный провод; 6 – дугогасительные рога; 7 – зажимы

**Fig. 2.** External appearance of the sectional insulator:

1 – insulating rod elements; 2 – mounting board; 3 – side bearing; 4 – suspension bracket; 5 – contact wire; 6 – arc-extinguishing horns; 7 – clamps

### Методика исследования

Рассмотрим модель прохождения СИ токоприемником электровоза под нагрузкой. СИ разделяет две секции контактной сети, запитанные от разных фидеров, из-за чего при подходе к нему электровоза под нагрузкой образуется разница потенциалов: напряжение в секции с нагруженной стороны, откуда движется ЭПС, оказывается ниже напряжения с противоположной стороны. Разница потенциалов определяется сопротивлением от шин питающей подстанции до места установки изолятора. При заходе на отключенную секцию разность потенциалов будет равна уровню напряжения в контактной сети, откуда движется ЭПС [9].

Схема питания составлена для участка контактной сети с двухсторонним питанием. СИ установлен в районе расположения тяговой подстанции, разделяя секции, запитанные от разных фидеров. Параметры контактной подвески включают активное и индуктивное сопротивление. На тяговой подстанции учитывается индуктивность реактора. Модель упрощена в части сглаживающего фильтра, а преобразователи, трансформаторы подстанции и система внешнего электропитания представлены одним элементом – внутренним активным сопротивлением.

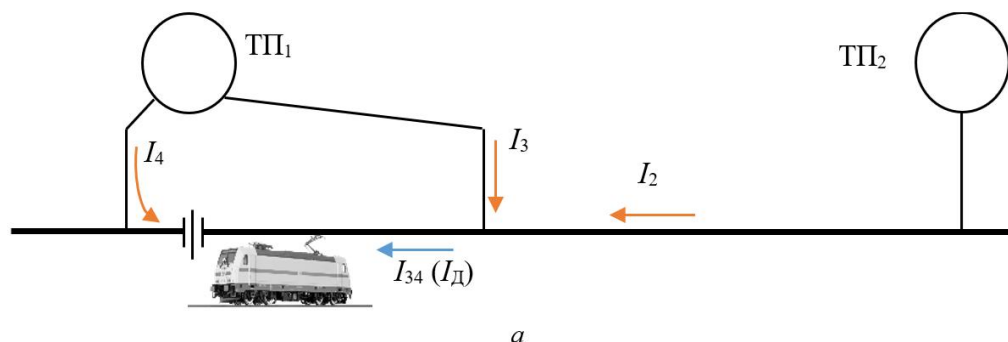
Конструкция СИ предполагает, что при проходе токоприемника происходит замыкание секций с последующим размыканием. Замыкание осуществляется через полз токоприемника, контактирующего одновременно с двумя скользящими, подключенным к контактным проводам с двух сторон изолятора. Цепь разрывается, когда полз токоприемника остается в контакте только с одним скользящим.

Процесс прохождения СИ можно разбить на три интервала: подход токоприемника; замыкание секций; разрыв цепи, соединяющей секции.

В момент подхода поезд движется, потребляя ток, который зависит от профиля, массы состава и управления его движением. Рекомендуется производить переход с одной секции на другую без нагрузки и с опущенным токоприемником, чтобы снизить вероятность его повреждения. Однако обратный подъем после выхода на следующую секцию может ухудшить ситуацию: при высоких скоростях движения или при сильном ветре обратный подъем токоприемника будет затруднен за счет аэродинамического воздействия.

При проходе изолятора без опускания токоприемника ток нагрузки может составлять от 0 до номинального тока ЭПС (2 500 А для грузового электровоза). Переход между секциями под нагрузкой будет сопровождать временный разрыв цепи, что повлечет образование дуги. Разрыв цепи выполняется за счет токоприемника, но при движении расстояние будет увеличиваться, пока токоприемник не перейдет на следующий скользящий. Тогда дуга, образовавшаяся при разрыве контакта, перекинется между скользящими и посредством магнитного поля, протекающего по ней тока, растянется на разрядных рогах.

Схема замещения участка тяговой сети с ЭПС представлена на рис. 3.  $E_1, E_2, R_1, R_2, L_1, L_2$  – параметры тяговых подстанций 1 и 2: напряжение холостого хода, внутреннее сопротивление и индуктивность реакторов;  $R_3, L_3$  – параметры линии питающей секцию, по которой движется ЭПС, до перехода;  $R_{34}, L_{34}$  – параметры контактной сети от точки присоединения питающей линии до СИ;  $R_{21}, L_{21}$  – параметры контактной сети, где движется ЭПС, от тяговой подстанции 2 до точки присоединения питающей линии;  $R_4, L_4$  – параметры линии, питающей секцию, на которую переходит ЭПС, и участок контактной сети от точки присоединения питающей линии до СИ;  $R_d$  – сопротивление



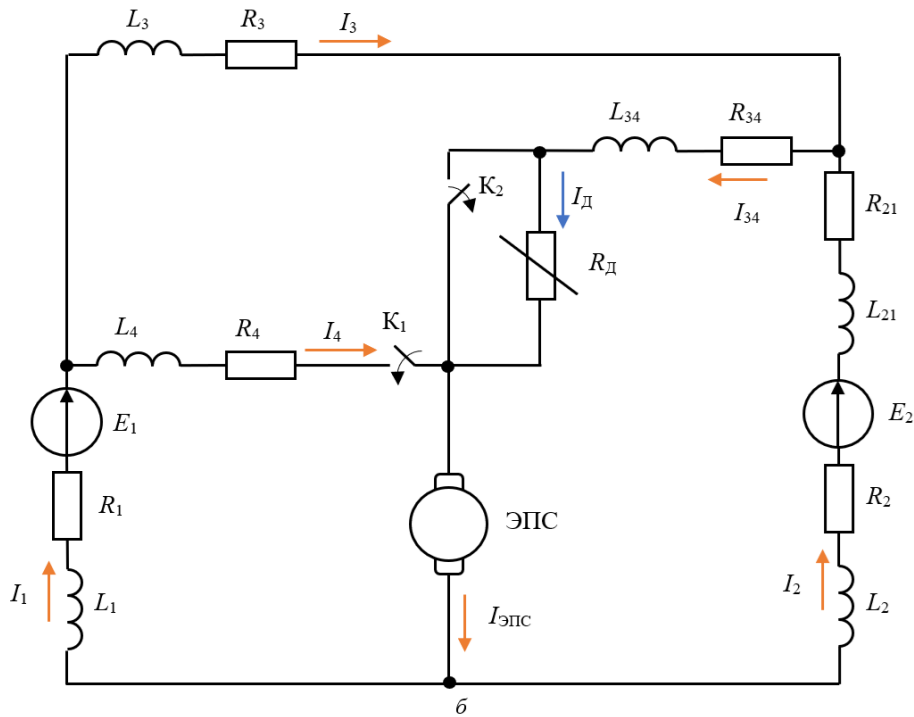


Рис. 3. Схема питания участка тяговой сети (а) и схема замещения (б)

Fig. 3. Power supply diagram of the traction network section (a) and replacement diagram (b)

ние дуги. Коммутация ключа  $K_2$  приводит к разрыву цепи, содержащей индуктивность. Поскольку такой разрыв должен мгновенно изменить ток в цепи до нулевого значения, что произойти не может, то в области размыкающихся контактов резко повышается напряжение, происходит пробой и ток продолжает течь, но уже через канал образовавшейся электрической дуги. Для этого в схему замещения введен элемент с переменным сопротивлением, имитирующим сопротивление дуги.

Электрическая дуга имеет нелинейное сопротивление, зависящее от ее длины и величины протекающего тока. В момент разрыва цепи длина дуги составляет 50 мм (расстояние между дугами разрядника на СИ для систем постоянного напряжения), но за счет электромагнитного воздействия она растягивается по рогам разрядника и цепь разрывается окончательно. Для описания вольтамперной характеристики дуги возможно использовать уравнение Г. Айртона:

$$U_D = \alpha + \beta \cdot l + \frac{\gamma + \delta \cdot l}{I_D},$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – постоянные, зависящие от материала дуг разрядника и параметров воздуха (состав, температура);  $l$  – длина дуги;  $I_D$  – ток дуги.

Дуга представляет собой токопроводящий канал, состоящий из плазмы и включающий процессы движения частиц как под действием электромагнитных полей (внешнего и внутреннего), так и механику взаимодействия разогнанных частиц (температура в дуге достигает порядка 2 500–3 000 К). Сложность моделирования дуги заключается в учете ее инерционных составляющих – индуктивности и тепловых процессов [10, 11]. При быстрых изменениях тока (изменяется быстрее, чем тепловые процессы в дуге) эти две составляющие могут компенсировать действия друг друга, в этом случае сопротивление дуги будет преимущественно активным.

Если рассматривать упрощенную статическую характеристику дуги [12], то ее активное сопротивление можно задать как

$$R_D = \frac{\alpha + \beta \cdot l}{I_D} + \frac{\gamma + \delta \cdot l}{I_D^2}.$$

ЭПС в задачах по расчету нагрузки в системе тягового электроснабжения замещается источником тока, который потребляется электровозом. Но для задачи с переходными процессами ЭПС следует рассматривать как для полной схемы, учитывающей характеристики двигателей, их соединение и управление, а

также механическую составляющую движения поезда [13–15]. За счет большой массы состава его скорость при прохождении СИ не успеет измениться и, соответственно, напряжение на клеммах электродвигателя останется постоянным, в отличие от электрических процессов в тяговой сети [16].

Модель состоит из двух частей – системы дифференциальных уравнений, описывающих электрическую схему, где ЭПС представлен источником тока, и дифференциальных уравнений, описывающих электромеханическую схему ЭПС и его движение.

Последние два выражения в системе уравнений отражают функциональную связь параметров работы электровоза, получаемую по результатам экспериментов – зависимость тока ЭПС от скорости и напряжения на токоприемнике, а также управления (схема питания, ток возбуждения двигателя, сопротивление в цепи якоря) и зависимость силы тяги от тока ЭПС и работы системы управления:

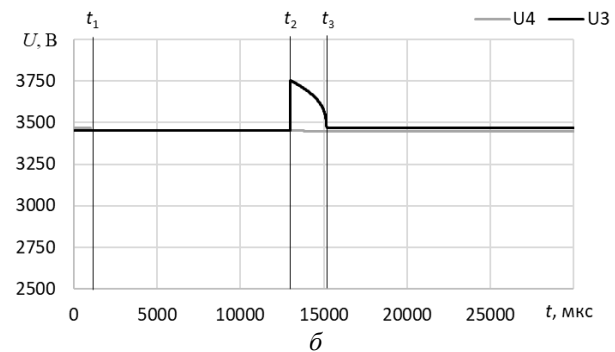
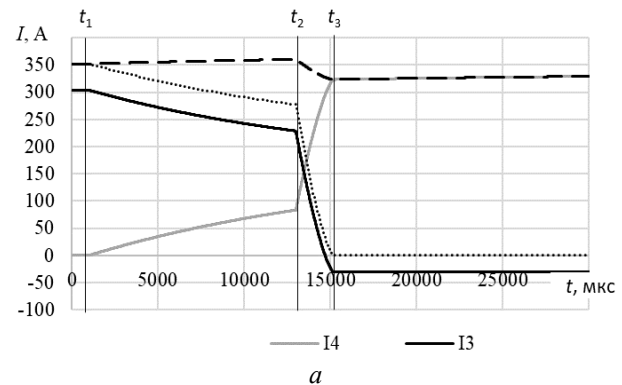
$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 + I_2 - I_5 = 0; \\ I_2 + I_3 - I_{34} = 0; \\ I_4 + I_{34} - I_{\text{ЭПС}} = 0; \\ I_3 \cdot R_3 + L_3 \frac{dI_3}{dt} + I_{34} \cdot R_{34} + L_{34} \frac{dI_{34}}{dt} - \\ - I_4 \cdot R_4 - L_4 \frac{dI_4}{dt} - R_{\text{д}} = 0; \\ I_1 \cdot R_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + I_3 \cdot R_3 + L_3 \frac{dI_3}{dt} - \\ - I_2 \cdot (R_2 + R_{21}) - (L_{21} + L_2) \frac{dI_2}{dt} = E_1 - E_2; \\ U_{\text{ЭПС}} = E_1 - I_1 \cdot R_1 - L_1 \frac{dI_1}{dt} - I_3 \cdot R_3 - L_3 \frac{dI_3}{dt} - \\ - I_{34} \cdot R_{34} - L_{34} \frac{dI_{34}}{dt} - R_{\text{д}}; \\ F_{\text{T}} - F_{\text{сопр}} - m \frac{dv}{dt} = 0; \\ I_{\text{ЭПС}} = f(U_{\text{ЭПС}}, v_{\text{ЭПС}}, I_{\text{В}}, R_{\text{ш}}); \\ F_{\text{T}} = f(I_{\text{ЭПС}}, I_{\text{В}}, R_{\text{ш}}). \end{array} \right.$$

### Результаты исследования и их обсуждение

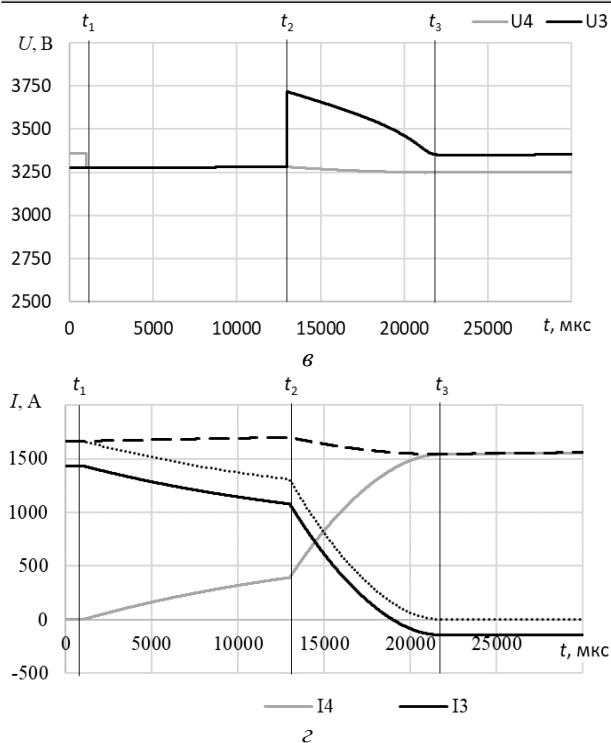
Время между двумя моментами коммутации зависит от скорости движения ЭПС и конструкции изолятора. Замыкание двух секций между собой приводит к распределению тока

нагрузки между двумя питающими линиями, подключенными к разным секциям контактной сети. Но с учетом индуктивности воздушных линий процесс этот занимает время. При малой скорости движения ток в момент замыкания может снизиться почти в 2 раза (зависит от соотношения сопротивления линий 3-й и 4-й), что создаст более благоприятные условия для прохождения токоприемника с точки зрения образования дуги.

На рис. 4 приведены графики изменения токов и напряжений в секциях контактной сети, полученных в результате моделирования прохода токоприемника СИ при скорости 60 км/ч с токами 350 А и 1 600 А. Поскольку скорость прохода смоделирована одинаковая, то время между коммутациями ( $t_1$  – замыкание,  $t_2$  – разрыв цепи) совпадает, но из-за разницы токов нагрузки ЭПС продолжительность горения дуги различается. Это видно по графикам тока  $I_{34}$  и напряжения  $U_3$ , приходящих со стороны секции, откуда движется ЭПС. В момент размыкания цепи напряжение резко поднимается, и между рогами разрядника образуется дуга. По мере ее растягивания и увеличения сопротивления ток снижается до нуля и напряжение становится равным напряжению в точке подключения питающей линии.







**Рис. 4.** Токи и напряжения в контактной сети при проходе секционного изолятора электроподвижного состава:

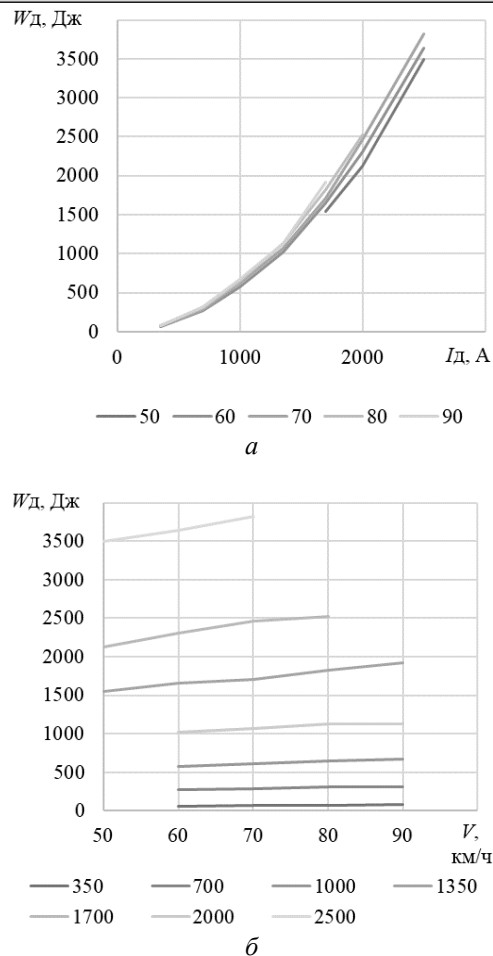
$a$  и  $b$  – при токе 350 А;  $в$  и  $г$  – при токе 1 600 А

**Fig. 4.** Currents and voltages in the contact network during the passage of the sectional insulator of electric rolling stock:

$a$  and  $b$  – at 350 А;  $в$  and  $г$  – at 1 600 А

Разрушительное действие дуги определяется количеством энергии, выделяемой в процессе ее горения. Она может быть определена по закону Джоуля – Ленца и зависит как от тока, так и от продолжительности его действия. Причем зависимость нелинейная, поскольку продолжительность протекания тока имеет прямую зависимость от его величины.

На рис. 5 представлены результаты моделирования энергии дуги, образуемой при проходе ЭПС через СИ с поднятым токоприемником под нагрузкой. С ростом тока нагрузки, как отмечено ранее, продолжительность горения дуги увеличивается, что сказывается и на возрастании выделяемой энергии. Скорость движения ЭПС влияет на момент разрыва цепи: чем меньше скорость, тем больше времени длится коммутационный процесс, вызванный замыканием секций, и тем меньше становится ток, который далее прерывается на изоляторе. Как следствие, с увеличением скорости движения ЭПС возрастает и количество энергии, выделяемой в дуге.



**Рис. 5.** Зависимость энергии дуги:

$a$  – от тока;  $b$  – от скорости поезда

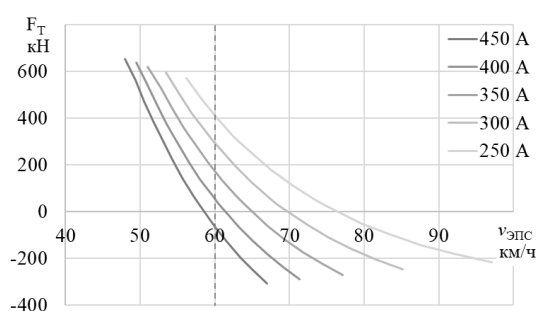
**Fig. 5.** Arc energy dependence:

$a$  – from current;  $b$  – from train speed

Горение дуги на секционном изоляторе происходит не только на его разрядных рогах, но и в месте контакта с токоприемником. Это вызвано динамикой механического взаимодействия. Поскольку секционный изолятор является жесткой точкой контактной сети, то движение по нему может сопровождаться механическим ударом с последующим отрывом. Кроме того, наклон изолятора (следствие разрегулировки), локальные износы его скользунов и вставки токоприемника создают разрывы цепи, сопровождающиеся дугой. С продолжительностью эксплуатации такие локальные повреждения ухудшают процесс токосъема, ускоряя износ и приводя к поломке секционного разъединителя [2, 7].

Как следует из результатов моделирования и опыта эксплуатации, проход СИ ЭПС должен проходить без тока нагрузки. Это мож-

но сделать, отключив питание двигателей, перейдя в режим выбега. Однако при движении состава на подъем отключение питания и переход на выбег с дальнейшим включением режима тяги будут сопровождаться коммутациями, которые негативно скажутся на ресурсе электрооборудования электровоза. Более эффективно в данном случае использовать управление режимом тяги за счет тока возбуждения, как это реализовано в электровозах ЭС6 «Синара». Увеличение тока возбуждения позволяет перейти на тяговую характеристику, при которой движение будет происходить с минимальным током (рис. 6) [17].



**Рис. 6.** Зависимости силы тяги электровоза от скорости движения электроподвижного состава при различных токах возбуждения

**Fig. 6.** Dependence of the traction force of an electric locomotive on the speed of the electric rolling stock at different ignition currents

В этот момент, когда сила тяги будет стремиться также к нулю, поезд пройдет участок по инерции. Затем ток возбуждения выводится на требуемый уровень и тяговые усилия восстанавливаются. В отличие от первого способа управления прохода СИ, резких скачков тягового тока в цепи не будет.

### Заключение

Для реализации управления движения ЭПС таким способом потребуется ввести соответствующий алгоритм в автоматику локомотива. Включение автоматики может производиться вручную или по данным системы контроля движения, в которую необходимо будет внести информацию о точках на пути следования, где потребуется движение либо с опущенным токоприемником, либо с нулевым тяговым током. Как вариант, возможно использование датчиков в зоне СИ, совмещенных с датчиками напряжения. В таком случае будет контролироваться заезд на секцию, питание которой отключено. Учитывая развитие технологий автоматизации ведения поездов и концепции единого информационного пространства [18, 19], реализация предложенного способа прохода СИ может быть выполнена без конструктивных изменений существующих систем.

### Список литературы

1. Сидоров О.А., Тарабин И.В., Дербилов Е.М. Совершенствование узлов скоростных контактных подвесок // Транспорт Урала. 2007. № 2 (13). С. 6–10.
2. Тарабин И.В. Повышение качества токосъема в местах расположения секционных изоляторов и фиксаторных узлов скоростных контактных подвесок : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2008. 16 с.
3. Сидоров О.А., Смердин А.Н., Голубков А.С. Экспериментальные исследования токосъемных устройств // Железнодорожный транспорт. 2015. № 11. С. 69–70.
4. Блинкова С.А., Скольский А.В. Оценка остаточного ресурса изоляторов контактной сети // Вестник Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2024. № 1 (93). С. 169–175.
5. Облегченные секционные изоляторы // Железные дороги мира. 2006. № 10. С. 39–45.
6. Тарабин И.В., Титова Т.С., Терехин И.А. Совершенствование конструкции секционного изолятора // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 4-5. С. 2–6.
7. Серкин И.Ю. Разработка устройства прохода токоприемника по секционному изолятору // Наукосфера. 2024. № 6-1. С. 318–323.
8. Выявление причин излома контактного провода на элементах устройств секционирования с применением фрактального исследования и спектрального анализа / И.В. Тарабин, Д.В. Муравьев, И.А. Кремлев и др. // Бюл. результатов науч. исслед. 2024. № 2. С. 42–50.
9. Кузнецов С.М., Демиденко И.С., Сухарева Е.А. Исследование переходных процессов в тяговой сети при проезде электроподвижного состава через секционный изолятор и совершенствование методики настройки уставок цифровой защиты // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 2013. № 6. С. 70–72.
10. Tarczynski W., Daszkiewicz T. Switching Arc Simulation // Przegląd Elektrotechniczny. 2012. Vol. 88. Iss. 7. P. 60–64.
11. Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion // The 27th International Conference on Electrical Contacts. Dresden, 2014. P. 1–5.
12. Доманов В.И., Карпунин К.Е., Сергеев А.В. Разработка математической модели электрической дуги дуговой сталеплавильной печи постоянного тока // Вестн. Ульяновск. гос. техн. ун-та. 2014. № 1 (65). С. 60–62.
13. Литовченко В.В., Назаров Д.В., Шаров В.А. Имитационная модель электровоза постоянного тока с коллектор-

ными тяговыми двигателями // Электротехника. 2019. № 9. С. 60–66.

14. Будаев А.А., Третьяков Е.А. Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2025. Т. 22. № 1. С. 92–101.

15. Фролов Н.О., Кузнецов А.И. Моделирование режимов работы тяговых электрических двигателей постоянного тока // Транспорт Урала. 2019. № 4 (63). С. 64–68.

16. Кузнецов А.И., Фролов Н.О. Математическое описание переходных процессов в силовых цепях электровозов постоянного тока с различными типами тягового электропривода // Транспорт Урала. 2019. № 2 (61). С. 76–79.

17. Жигулин Н.А., Пудовиков О.Е. Математическая модель объекта управления и модуля задатчика напряжения СТПР-1000 для системы автоматического управления скоростью поезда с электровозом 2ЭС6 // Известия Транссиба. 2023. № 1 (53). С. 10–19.

18. Авдиенко Е.Г., Третьяков Е.А. Повышение эффективности использования системы автоведения грузовых электровозов по данным текущих измерений бортовых систем и мгновенных тяговых расчетов // Известия Транссиба. 2022. № 2 (50). С. 55–65.

19. Третьяков Е.А., Денисов И.Н., Авдиенко Е.Г. Управление электротяговыми нагрузками на основе взаимодействия с системой электроснабжения железных дорог // Транспорт Урала. 2024. № 1 (80). С. 116–123.

## References

1. Sidorov O.A., Tarabin I.V., Derbilov E.M. Sovershenstvovanie uzlov skorostnykh kontaknykh podvesok [Improving the nodes of high-speed contact suspensions]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2007, no 2 (13), pp. 6–10.

2. Tarabin I.V. Povyshenie kachestva tokos'ema v mestakh raspolozheniya sektionnykh izolyatorov i fiksatornykh uzlov skorostnykh kontaknykh podvesok [Improving the quality of current collection at the locations of sectional insulators and locking units of high-speed contact suspensions]. Ph.D.'s theses. Omsk, 2008. 16 p.

3. Sidorov O.A., Smerdin A.N., Golubkov A.S. Eksperimental'nye issledovaniya tokos'emnykh ustroystv [Experimental researchers of current collectors]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2015, no 11, pp. 69–70.

4. Blinkova S.A., Skol'skii A.V. Otsenka ostatochnogo resursa izolyatorov kontaktnoi seti [Assessment of the remaining life of contact network insulators]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2024, no 1 (93), pp. 169–175.

5. Oblegchennye sektionnye izolyatory [Lightweight sectional insulators]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world], 2006, no 10, pp. 39–45.

6. Tarabin I.V., Titova T.S., Terekhin I.A. Sovershenstvovanie konstruktssii sektionnogo izolyatora [Improvement of the sectional insulator design]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2022, no 4-5, pp. 2–6.

7. Serkin I.Yu. Razrabotka ustroystva prokhoda tokopriemnika po sektionnomu izolyatoru [Development of a device for passing a pantograph through a sectional insulator]. *Naukosfera* [The science Sphere], 2024, no 6-1, pp. 318–323.

8. Tarabin I.V., Murav'ev D.V., Kremlev I.A., Terekhin I.A. Vyyavlenie prichin izloma kontaktnogo provoda na elementakh ustroystv sektionirovaniya s primeneniem fraktograficheskogo issledovaniya i spektral'nogo analiza [Identification of the causes of contact wire breakage on the elements of sectioning devices using fractographic research and spectral analysis]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2024, no 2, pp. 42–50.

9. Kuznetsov S.M., Demidenko I.S., Sukhareva E.A. Issledovanie perekhodnykh protsessov v tyagovoi seti pri proезде elektropodvizhnogo sostava cherez sektionnyi izolyator i sovershenstvovanie metodiki nastroiki ustavok tsifrovoy zashchity [Investigation of transients in the traction network during the passage of an electric rolling stock through a sectional insulator and improvement of the methodology for setting digital protection settings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* [Bulletins of higher educational organizations. Electromechanics], 2013, no 6, pp. 70–72.

10. Tarczynski W., Daskiewicz T. Switching Arc Simulation // *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, Vol. 88, iss. 7, pp. 60–64.

11. Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H. Low-voltage Circuit Breaker Arc Simulation Including Contact Arm Motion // *The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014)*. Dresden, 2014.

12. Domanov V.I., Karpuhin K.E., Sergeev A.V. Razrabotka matematicheskoi modeli elektricheskoi dugi dugovoi staleplavil'noi pechi postoyannogo toka [Development of a mathematical model of the electric arc of a direct current arc steelmaking furnace]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University], 2014, no 1 (65), pp. 60–62.

13. Litovchenko V.V., Nazarov D.V., Sharov V.A. Imitatsionnaya model' elektrovoza postoyannogo toka s kollektornymi tygovymi dvigatelyami [Simulation model of a DC electric locomotive with collector traction motors]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2019, no. 9, pp. 60–66.

14. Budaev A.A., Tret'yakov E.A. Modelirovanie elektricheskoi chasti грузового электровоза на основе технологий «Tsifrovoy dvoynik» [Simulation of the electrical part of an electric freight locomotive based on the Digital Twin technology]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Saint Petersburg Transport University], 2025, Vol. 22, no 1, pp. 92–101.

15. Frolov N.O., Kuznetsov A.I. Modelirovanie rezhimov raboty tyagovykh elektricheskikh dvigatelei postoyannogo toka [Simulation of operating modes of DC traction electric motors]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2019, no 4 (63), pp. 64–68.

16. Kuznetsov A.I., Frolov N.O. Matematicheskoe opisanie perekhodnykh protsessov v silovykh tsepyakh elektrovozov postoyannogo toka s razlichnymi tipami tyagovogo elektroprivoda [Mathematical description of transients in power circuits of DC electric locomotives with various types of traction electric drive]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2019, no 2 (61), pp. 76–79.

17. Zhigulin N.A., Pudovikov O.E. Matematicheskaya model' ob'ekta upravleniya i modulya zadatchika napryazheniya STPR-1000 dlya sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu poezda s elektrovozom 2ES6 [Mathematical model of the

control object and the STPR-1000 voltage sensor module for the automatic speed control system of a train with an electric locomotive 2ES6], *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2023, no 1 (53), pp. 10–19.

18. Avdienko E.G., Tret'yakov E.A. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya sistemy avtovedeniya gruzovykh elektrovozov po dannym tekushchikh izmerenii bortovykh sistem i mgnovennykh tyagovykh raschetov [Improving the efficiency of using the truck guidance system for electric locomotives based on current measurements of on-board systems and instant traction calculations]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2022, no 2 (50), pp. 55–65.

19. Tret'yakov E.A., Denisov I.N., Avdienko E.G. Upravlenie elektrotiyagovymi nagruzkami na osnove vzaimodeistviya s sistemoi elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog [Management of electric traction loads based on interaction with the railway power supply system]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2024, no 1 (80), pp. 116–123.

### Информация об авторах

**Добрынин Евгений Викторович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроснабжения железнодорожного транспорта, Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара; e-mail: dobrinin@samgups.ru.

**Гаранин Максим Алексеевич**, доктор экономических наук, доцент, ректор, Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара; e-mail: garanin@samgups.ru.

**Плохов Евгений Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры тягового подвижного состава, Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара; e-mail: e.plohov@samgups.ru.

**Скольский Андрей Владимирович**, аспирант кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта, Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара, e-mail: a.skolski@samgups.ru.

### Information about the authors

**Evgenii V. Dobrynin**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Power Supply of Railway Transport, Volga State Transport University, Samara, e-mail: dobrinin@samgups.ru.

**Maksim A. Garanin**, Doctor of Economic Science, Associate Professor, Rector, Volga State Transport University, Samara, e-mail: garanin@samgups.ru.

**Evgenii M. Plokhov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Traction Rolling Stock, Volga State Transport University, Samara, e-mail: e.plohov@samgups.ru.

**Andrei V. Skol'skii**, Ph.D. Student of the Department of Power Supply of Railway Transport, Volga State Transport University, Samara, e-mail: a.skolski@samgups.ru.

## Влияние статической осевой нагрузки высокоскоростных электропоездов на силы, возникающие в системе «колесо – рельс»

А.В. Саидова<sup>1</sup>✉, В.И. Федорова<sup>2</sup>, А.Н. Комарова<sup>2</sup>, А.С. Семенова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва, Российская Федерация

✉av-saidova@yandex.ru

### Резюме

Развитие высокоскоростного пассажирского движения в России – актуальная многосторонняя задача, стоящая перед научными, проектировочными и промышленными центрами страны. Во многих государствах мира (КНР, Япония, Австрия, Франция) уже эксплуатируются поезда со скоростями вплоть до 350 км/ч. В России максимальную скорость движения (250 км/ч) развивает только электропоезд «Сапсан», и то на выделенном участке Окуловка – Мстинский мост (на остальном маршруте – 200 км/ч). Повышение допускаемых скоростей движения и разработка новых высокоскоростных поездов требуют решения многих задач, касающихся как подвижного состава, так и железнодорожного пути. В статье рассмотрен вопрос влияния статической осевой нагрузки моторных и немоторных вагонов электропоезда на силы, возникающие между колесами и рельсами при движении со скоростями, достигающими до 400 км/ч. Эти силы, в свою очередь, позволяют оценивать динамическое поведение вагонов и их воздействие на железнодорожный путь. Сравнение сил производилось методом имитационного компьютерного моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм» для осевых нагрузок 17,0 / 17,5 / 18,0 тс. За основу принимались компьютерные модели вагонов электропоезда «Сапсан» отдельно и в составе поезда. В заключении сделаны выводы о влиянии увеличенной статической осевой нагрузки на горизонтальные (продольные и поперечные) и вертикальные силы в системе «колесо – рельс», оценено изменение величин рамных сил и динамической погонной нагрузки, показателей плавности хода.

### Ключевые слова

высокоскоростное движение, статическая осевая нагрузка, электропоезд «Сапсан», программный комплекс «Универсальный механизм», система «колесо – рельс», моторный вагон, немоторный вагон

### Для цитирования

Влияние статической осевой нагрузки высокоскоростных электропоездов на силы, возникающие в системе «колесо – рельс» / А.В. Саидова, В.И. Федорова, А.Н. Комарова, А.С. Семенова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 20–30. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).20-30.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 28.05.2025 г.; поступила после рецензирования: 10.09.2025 г.; принята к публикации: 11.09.2025 г.

## The influence of static axial load of high-speed electric trains on the forces generated in the wheel–rail system

A.V. Saidova<sup>1</sup>✉, V.I. Fedorova<sup>2</sup>, A.N. Komarova<sup>2</sup>, A.S. Semenova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg, the Russian Federation

<sup>2</sup>Scientific Research Institute of Railway Transport, Moscow, the Russian Federation

✉av-saidova@yandex.ru

### Abstract

The development of high-speed passenger transport in Russia is a pressing multifaceted task facing the country's scientific, design, and industrial centers. In many countries around the world (China, Japan, Austria, France), trains with speeds of up to 350 km/h are already in operation, while in Russia, the maximum speed of 250 km/h is reached only by the Sapsan electric train (and that is on the dedicated section between Okulovka and Mstinsky Bridge, with 200 km/h on the rest of the route). Increasing permissible speeds and developing new high-speed trains requires solving many problems related to both rolling stock and railway tracks. This paper examines the influence of the static axle load of motor and non-motor wagons of an electric train on the forces arising between the wheels and rails when traveling at speeds of up to 400 km/h. These forces, in turn, make it possible to assess the dynamic behavior of wagons and their impact on the railway track. The forces were compared using simulation computer modeling methods in the Universal Mechanism software package for axle loads of 17,0 / 17,5 / 18,0 t. Computer models of the Sapsan electric train wagons separately and all train served as the basis. In the final part conclusions are drawn about the influence of increased static axial load on horizontal (longitudinal and transverse) and vertical forces between the wheels and rails, changes are assessed in frame forces and dynamic linear load, indicators of ride smoothness and passenger comfort.

**Keywords**

high-speed movement, static axial load, Sapsan electric train, Universal Mechanism software package, wheel–rail system, motor wagon, non-motor wagon

**For citation**

Saidova A.V., Fedorova V.I., Komarova A.N., Semenova A.S. Vliyaniye staticheskoi osevoi nagruzki vysokoskorostnykh elektropoezdov na siliy, voznikayushchie v sisteme «koleso – rel's» [The influence of static axial load of high-speed electric trains on the forces generated in the wheel – rail system]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. № 3(87). Pp. 20–30. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).20-30.

**Article Info**

Received: May 28, 2025; Revised: September 10, 2025; Accepted: September 11, 2025.

**Введение**

В России максимальная скорость движения пассажирского электропоезда составляет 250 км/ч. В Европе эти скорости составляют до 320 км/ч, в Китае и Японии – до 350 км/ч (табл. 1) [1–5]. Для повышения скоростей пассажирских перевозок в России с 2023 г. активизированы работы по созданию высокоскоростной магистрали Санкт-Петербург – Москва.

**Таблица 1.** Мировой опыт высокоскоростного и скоростного железнодорожного движения

**Table 1.** World experience of high-speed railway traffic

Скорость движения, км/ч Speed movement, km/h	Перечень стран List of countries
Более 250 More than 250	Австрия, Бельгия, Великобритания, Германия, Испания, Италия, Китай, Нидерланды, Турция, Франция, Южная Корея, Япония Austria, Belgium, Great Britain, Germany, Spain, Italy, China, Netherlands, Türkiye, France, South Korea, Japan
160–250	Греция, Дания, Норвегия, Польша, Россия, Португалия, США, Финляндия, Швейцария, Швеция Greece, Denmark, Norway, Poland, Russia, Portugal, USA, Finland, Switzerland, Sweden
Менее 250 Less than 250	Австралия, Аргентина, Венгрия, Израиль, Ирландия, Исландия, Мексика, Чехия, Эстония Australia, Argentina, Hungary, Israel, Ireland, Iceland, Mexico, Czech Republic, Estonia

Что касается осевой нагрузки высокоскоростных поездов, то по требованиям Евросоюза скорости 250–350 км/ч возможны при максимальной статической осевой нагрузке вагона до 17 тс [6]. В России электропоезд «Сапсан» име-

ет максимальную статическую осевую нагрузку 17,0–17,5 тс. Увеличение осевой нагрузки до 21,5 тс возможно при снижении допускаемых скоростей движения [6], поскольку рост статической осевой нагрузки влияет на динамическое поведение экипажа, увеличивает воздействие на путь, износы в системе «колесо – рельс», энергозатраты и т.д.

Цель настоящей работы – исследовать влияние разной статической осевой нагрузки вагонов электропоездов (от 17 до 18 тс) на силы, возникающие в системе «колесо – рельс». По дополнительным показателям (коэффициенты вертикальной и горизонтальной динамики обрессоренных частей, рамные силы и динамическая погонная нагрузка) оценить их влияние на динамику вагонов, а также отследить изменение осевой нагрузки и показателей плавности хода вагонов.

Объектами исследования являлись моторный и немоторный вагоны высокоскоростного электропоезда (отдельно и в составе поезда). Метод, используемый в работе, – компьютерное имитационное моделирование в среде программного комплекса «Универсальный механизм» [7].

### **Создание компьютерных моделей вагонов и поезда**

Создание моделей моторного и немоторного вагонов электропоезда проводилось в программном комплексе «Универсальный механизм» на базе электропоезда «Сапсан» [8, 9]. Выбранные компьютерные модели подтвердили свою адекватность по результатам сравнения ускорений в буксовых узлах вагонов, получаемых при моделировании, и по экспериментальным измерениям [10, 11].

Конструктивно моторные и немоторные тележки являются максимально унифицированными узлами вагонов электропоезда. Разли-

чия между ними обуславливаются наличием компонентов тягового привода и его расположением в моторной тележке [12], что в модели отражается заданием разных массово-инерционных характеристик (табл. 2) [13].

**Таблица 2.** Массовые характеристики тел для моторной и немоторной тележек электропоезда  
**Table 2.** Mass characteristics of bodies for motor and non-motor bogies of an electric train

Масса, кг Weight, kg	Значение для вагона Meaning for the wagon	
	Немоторного Non-motor	Моторного Motor
Тележки с траверсой (включая шкворень траверсы и лемнискатный механизм) Bogies with a crossbar (including the crossbar pin) and lemniscate mechanism)	8 800	11 000
Рамы тележки (включая пружинные элементы, тормозную систему и электродвигатели) Trolley frames (including spring elements, braking system and electric motors)	2 250	4 250
Колесной пары (включая редуктор в моторном вагоне) wheelset (including gearbox in a motor wagon)	1 785	2 100

Моторная тележка включает следующие основные компоненты (в модель входят и твердые тела): две колесные пары; четыре корпуса букс; сварная рама тележки; траверса тележки. Их связывает между собой двухступенчатое рессорное подвешивание (рис. 1).

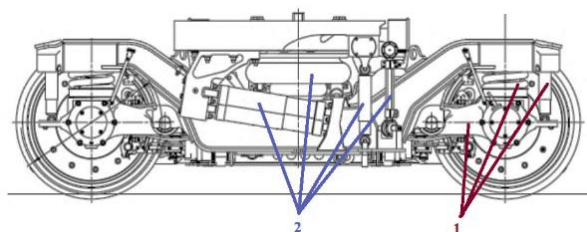
На рис. 2 показана разработанная модель немоторной тележки электропоезда (на базе поезда «Сапсан»). В первой ступени подвешивания связи тел смоделированы следующим образом:

- корпус буксы имеет вращательную степень свободы относительно колесной пары;
- комплект пружин, воспринимающий вертикальную нагрузку в первой ступени подвешивания, реализован билинейным элемен-

том с заданием жесткостей внутренней и наружной пружин;

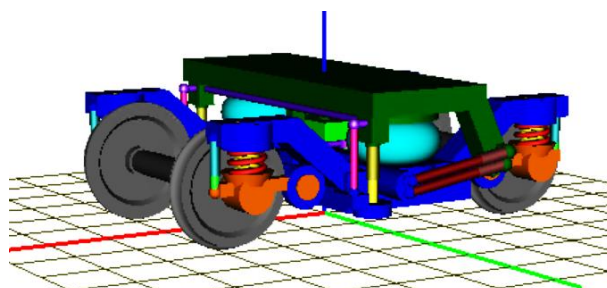
- упругий ограничитель вертикального перемещения – резинометаллический амортизатор, на который опирается комплект пружин, – смоделирован элементом «сайлент-блок»;

- упругий элемент, воспринимающий горизонтальную, продольную и поперечную нагрузки и связывающий буксовый поводок с рамой тележки, также реализован элементом «сайлент-блок».



**Рис. 1.** Тележка с элементами рессорного подвешивания первой (красный цвет) и второй (синий цвет) ступеней

**Fig. 1.** Bogie with elements of spring suspension of the first (red) and second (blue) steps



**Рис. 2.** Модель тележки немоторного вагона, разработанная в комплексе «Универсальный механизм»

**Fig. 2.** A model of a non-motorized wagon bogie developed in the Universal Mechanism complex

Вторая ступень подвешивания состоит из двух пневматических рессор в виде пневматических баллонов, гидравлических гасителей вертикальных колебаний и гидравлических гасителей виляния и поперечных колебаний.

Пневмоподвешивание реализовано линейным упруго-вязким элементом. Дополнительно осуществляется связь кузова вагона с тележкой через гидродемпферы (смоделированы биполярными силовыми элементами с поточечным заданием нелинейной силовой характеристики) и поперечные упоры (в модели реализованы элементом «сайлент-блок»), служащие для подрессоривания кузова относительно тележки при колебаниях бокового отбоя.

Боковая качка кузова регулируется торсионном. Его работа в модели описывалась двумя Г-образными стержнями с вращательными степенями свободы.

Поезд состоял из десяти вагонов: четырех моторных и шести немоторных (рис. 3). Моторными являются два головных вагона (01, 10) и два вагона в середине поезда (вагоны с тяговым преобразователем 04, 07).

В расчетах принимался профиль колеса ВНИИЖТ-РМ-70 [14], который в настоящее время используется для поездов «Сапсан», рельс – Р65. Характеристики связи рельса с подрельсовым основанием приведены в табл. 3, модель пути – безмассовая.

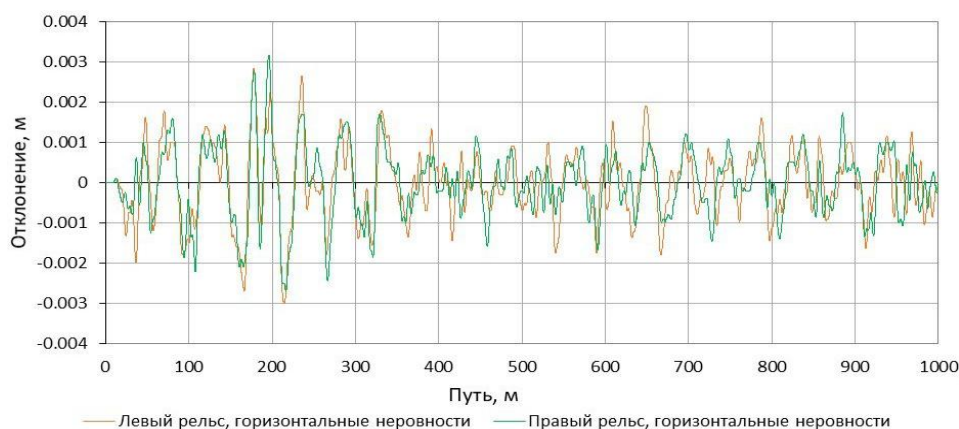
**Таблица 3.** Характеристики связи рельса с подрельсовым основанием в модели  
**Table 3.** Characteristics of the rail connection with the sub-rail base in the model

Параметр Parameter	Значение Meaning
Горизонтальная (поперечная) жесткость, МН/м Horizontal (transverse) stiffness, MN/m	20
Вертикальная жесткость, МН/м Vertical stiffness, MN/m	50
Угловая жесткость рельса на поворот, МН·м/рад Angular rigidity of rail for turning, MN m/rad	0,66



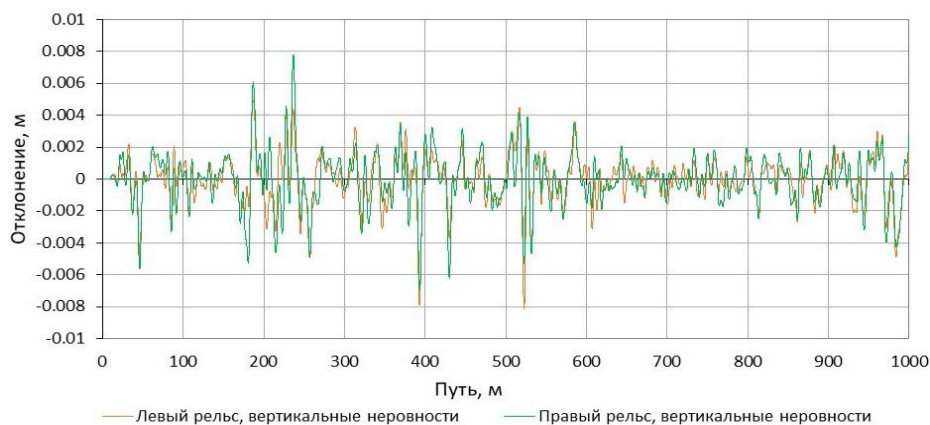
**Рис. 3.** Схема формирования поезда «Сапсан»

**Fig. 3.** Sapsan train formation scheme



**Рис. 4.** Горизонтальные неровности рельсовых нитей

**Fig.4.** Horizontal irregularities of rails



**Рис. 5.** Вертикальные неровности рельсовых нитей

**Fig. 5.** Vertical irregularities of rails



### Условия движения вагонов

Движение вагонов осуществлялось по прямому и кривым участкам пути с неровностями, соответствующими требованиям СТУ по максимально-допускаемым значениям отклонений от номинального положения по ширине колеи, уровню, перекоосу и просадкам (рис. 4, 5) [15].

Минимальный радиус кривой 10 000 м выбран согласно [16, 17]. Возвышение наружного рельса в кривой (табл. 4) принималось по условию не превышения допускаемого значения непогашенного ускорения: +0,4 м/с<sup>2</sup> при скорости 400 км/ч; +0,5 м/с<sup>2</sup> при скорости 350 км/ч; +0,6 м/с<sup>2</sup> при скорости 300 км/ч; +0,7 м/с<sup>2</sup> при скорости 250 км/ч и менее; +норма отрицательного непогашенного ускорения не должна превышать –0,6 м/с<sup>2</sup>.

**Таблица 4.** Значения непогашенного ускорения при различной величине возвышения наружного рельса в кривой 10 000 м

**Table 4.** Values of acceleration at different elevation values of the outer rail in the 10 000 m curve

Возвышение наружного рельса, мм Rise of outer rail, mm	Скорость движения, км/ч Speed movement, km/h	Непогашенное ускорение, м/с <sup>2</sup> Outstanding acceleration, m/s <sup>2</sup>
90	200	–0,25
	250	–0,08
	300	0,14
	350	0,39
	–	–
120	200	–0,44
	250	–0,26
	300	–0,05
	350	0,20
135	400	0,40
145	200	–0,59
150	250	–0,45
	300	–0,24
	350	0,01
	400	0,30

### Оцениваемые показатели движения

Исследование влияния статической осевой нагрузки, лежащей в диапазоне от 17 до 18 тс, на движение вагонов производилось по двум основным показателям:

- вертикальная сила, действующая от колес на рельсы;
- горизонтальная боковая (поперечная) сила, действующая от колес на рельсы.

Для дополнительной оценки горизонтальной и вертикальной динамики вагонов и их воздействия на путь использовались показатели:

– отношение рамной силы к статической осевой нагрузке (в соответствии с ГОСТ 34093 [18]);

– динамическая погонная нагрузка, учитывающая коэффициент динамической добавки обрессоренных частей первой ступени подвешивания, обусловленный колебаниями подпрыгивания и галопирования  $K_{до}^{пт}$ , характеризующая вертикальную динамику экипажей и рассчитываемая в соответствии с ГОСТ 34759 [19] по формуле (1):

$$q = \frac{n \cdot P_{ос} (1 + K_{до}^{пт})}{l + 2,2}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество осей в тележке;  $l$  – расстояние между крайними осями в тележке, м;  $P_{ос}$  – статическая осевая нагрузка, кН.

Боковые и вертикальные силы, передаваемые от подвижного состава на путь, отношение рамной силы к статической осевой нагрузке оценивались по максимально вероятным значениям с вероятностью 0,994 (требования ГОСТ 34759 [19]).

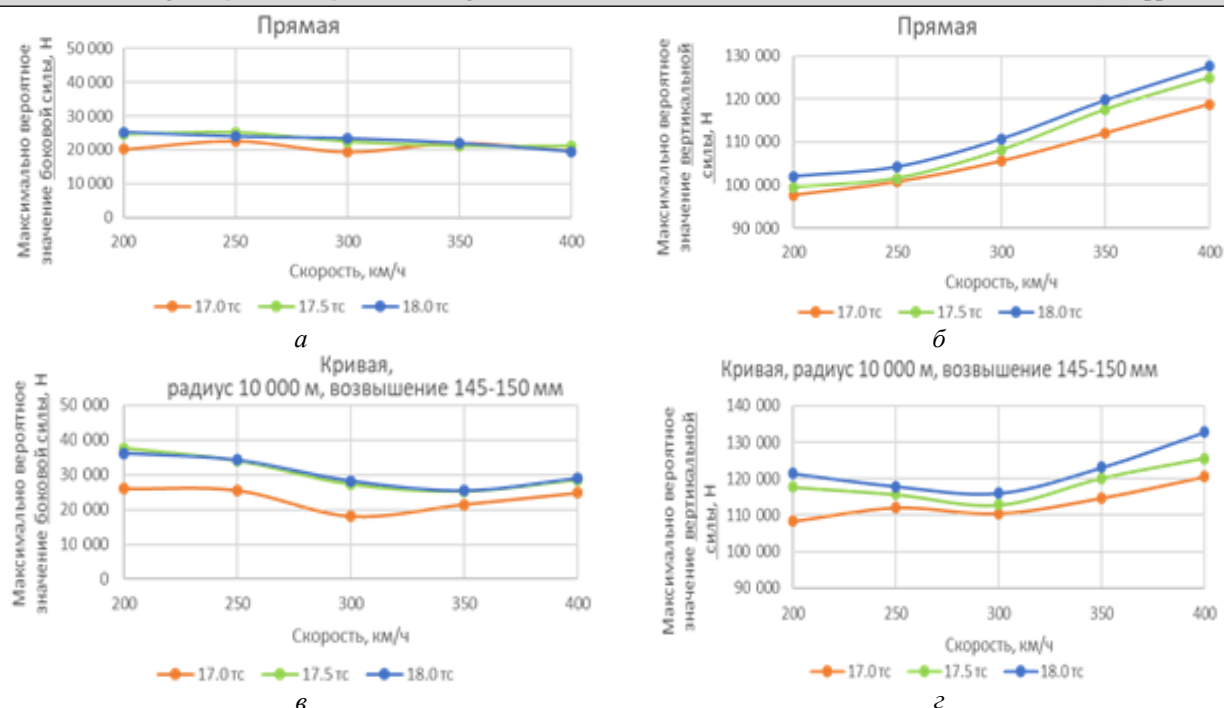
Исследование влияния статической осевой нагрузки, лежащей в диапазоне от 17 до 18 тс, на силы взаимодействия колес поезда и рельса оценивалось по значениям сил в системе «колесо – рельс» в кривой радиусом 10 000 м на скорости движения 250 км/ч. Дополнительно анализировалось влияние статической осевой нагрузки на значения показателей плавности хода в соответствии с [20].

### Результаты расчетов

Полученные результаты расчетов сил, возникающих между колесами и рельсами для моторного и немоторного вагонов, представлены в виде графиков на рис. 6 и 7 соответственно.

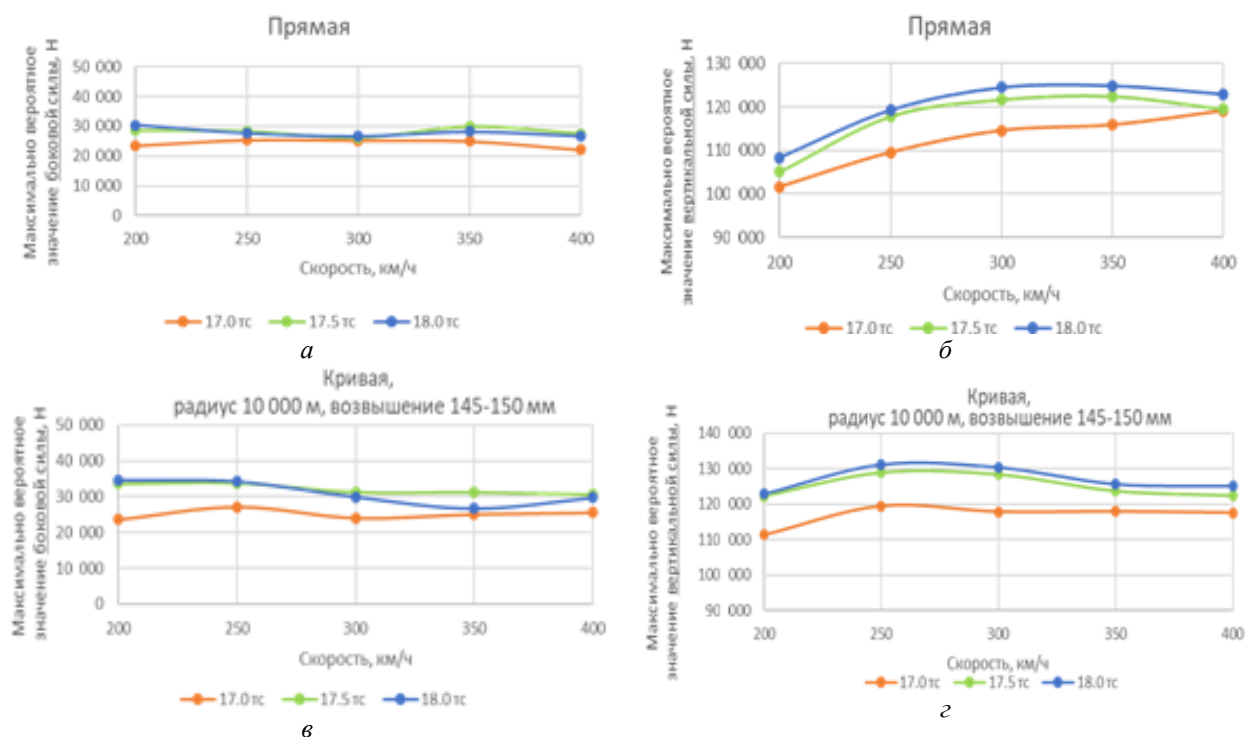
Анализ результатов при росте осевой нагрузки с 17 до 18 тс (5,5 %) позволяет сделать следующие выводы:

- при движении вагонов по прямому участку пути наблюдается увеличение боковых сил на систему «колесо – рельс» до 25 % у немоторных вагонов и до 30 % у моторных, увеличение вертикальных сил составляет 8–10 %.
- при движении вагонов в кривой радиусом 10 000 м наблюдается увеличение боковых сил на систему «колесо – рельс» до 50 %, увеличение вертикальных сил составляет 10–12 %.



**Рис. 6.** Результаты расчета боковых и вертикальных сил между колесами и рельсами немоторного вагона при его движении в прямой (а, б) и кривой радиусом 10 000 м (в, г)

**Fig. 6.** The results of calculating the lateral and vertical forces between the wheels and rails of a non-motorized wagon when moving in a straight track (а, б) and curve with a radius of 10 000 m (в, г)



**Рис. 7.** Результаты расчета боковых и вертикальных сил между колесами и рельсами моторного вагона при его движении в прямой (а, б) и кривой радиусом 10 000 м (в, г)

**Fig. 7.** The results of calculating the lateral and vertical forces between the wheels and rails of a motorized wagon when moving in a straight track (а, б) and curve with a radius of 10 000 m (в, г)

На рис. 8 приведены результаты расчетов дополнительных показателей движения для немоторного вагона (отношение рамной силы к статической осевой нагрузке и динамической погонной нагрузке, определенной по формуле (1)).

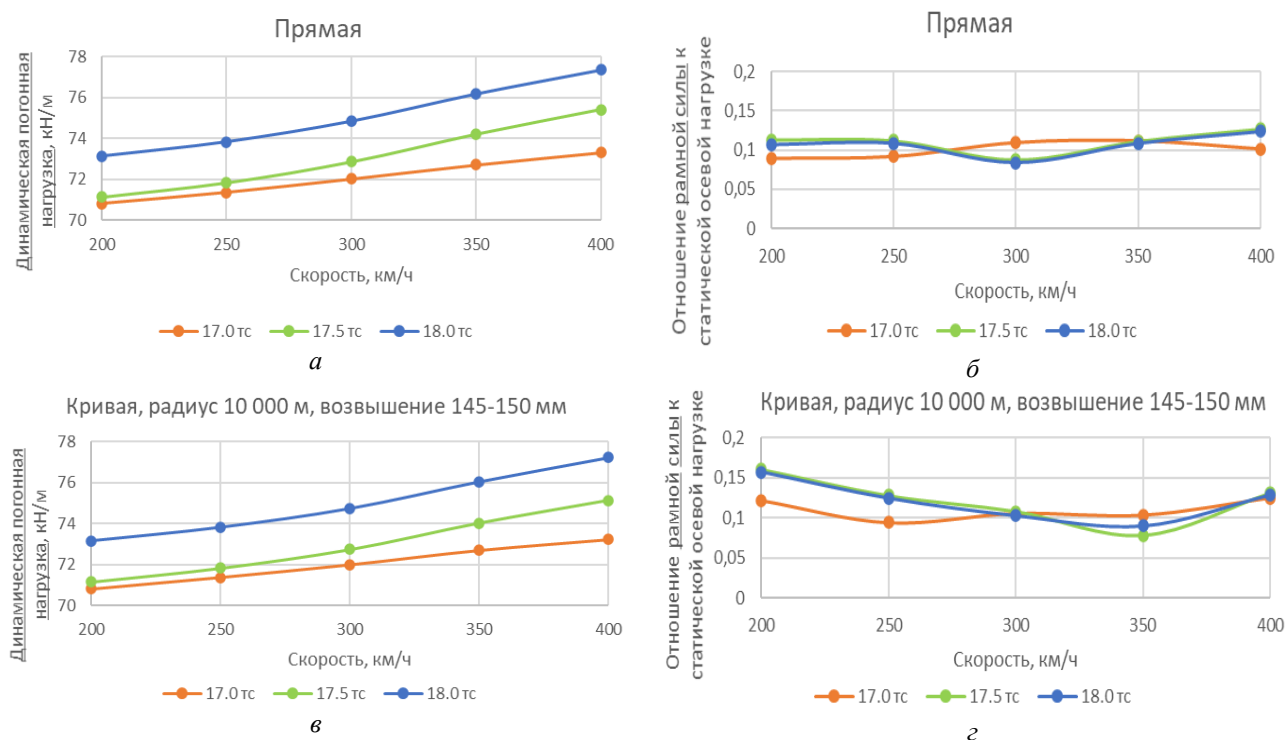
По дополнительным показателям при росте статической осевой нагрузки с 17 до 18 тс получено:

– отношение рамной силы к статической

осевой нагрузке не имеет явно выраженного характера увеличения;

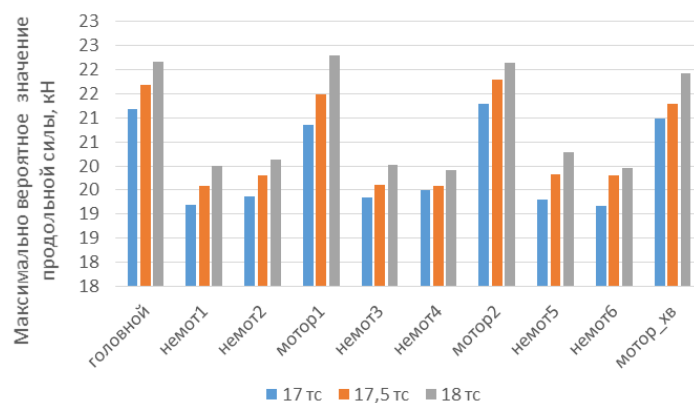
– динамическая погонная нагрузка увеличивается в прямых и кривых участках пути до 6 %.

Полученные по результатам расчетов значения сил воздействия колес поезда из десяти вагонов на рельсы представлены в виде графиков на рис. 9–11 соответственно.



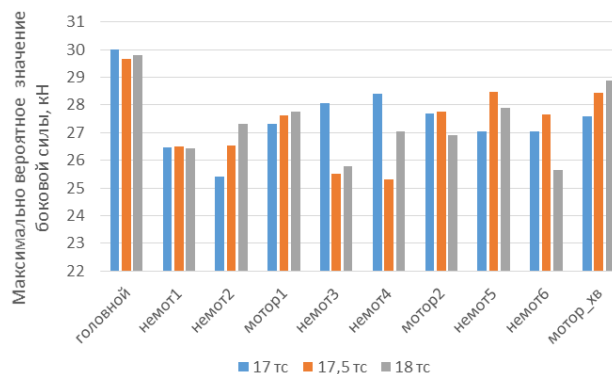
**Рис. 8.** Результаты расчета рамных сил и динамической погонной нагрузки немоторного вагона при его движении в прямой (а, б) и кривой (в, г) радиусом 10 000 м

**Fig. 8.** The results of calculating the frame forces and dynamic load of a non-motorized wagon when moving in a straight track (а, б) and curve (в, г) with a radius of 10 000 m



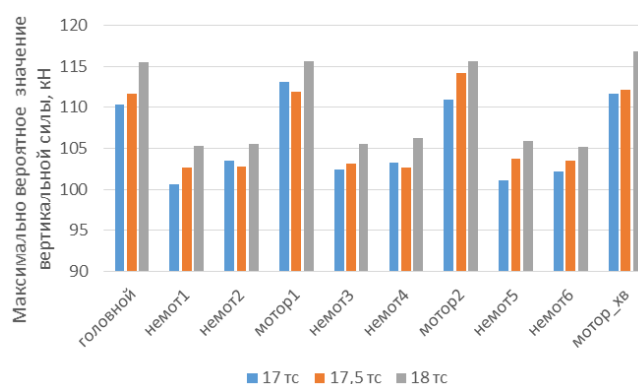
**Рис. 9.** Результаты расчета продольных сил между колесами и рельсами вагонов поезда при его движении в кривой радиусом 10 000 м

**Fig. 9.** The results of the calculation of the longitudinal forces between the wheels and rails of the train wagons when moving in a curve with a radius of 10,000 m



**Рис. 10.** Результаты расчета боковых сил между колесами и рельсами вагонов поезда при его движении в кривой радиусом 10 000 м

**Fig. 10.** The results of the calculation of the lateral forces between the wheels and rails of the train wagons when moving in a curve with a radius of 10 000 m



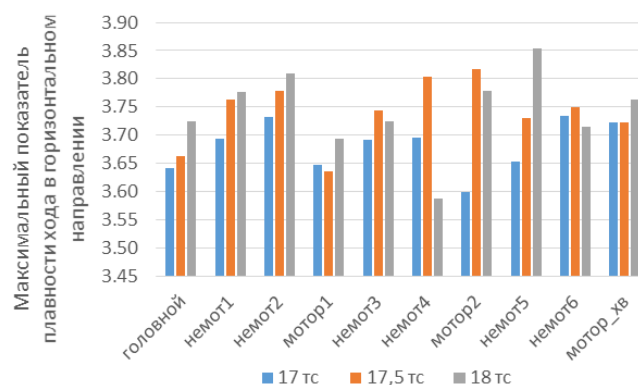
**Рис. 11.** Результаты расчета вертикальных сил между колесами и рельсами вагонов поезда при его движении в кривой радиусом 10 000 м

**Fig. 11.** The results of the calculation of the vertical forces between the wheels and rails of the train wagons when moving in a curve with a radius of 10 000 m

Анализ результатов сил воздействия поезда на рельсы при росте осевой нагрузки с 17 до 18 тс (5,5 %) показал, что при движении поезда в кривой радиусом 10 000 м наблюдается увеличение продольных, боковых и вертикаль-

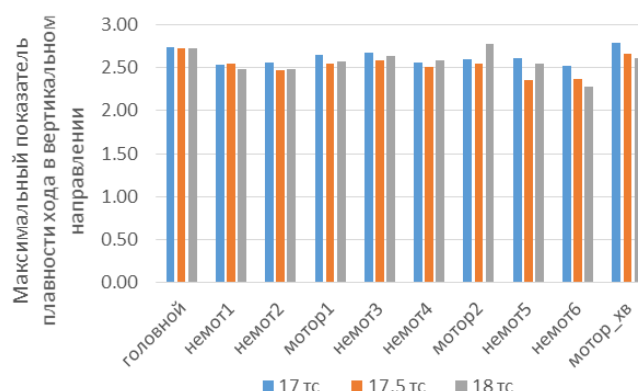
ных сил в системе «колесо–рельс» до 10 %.

Полученные по результатам расчетов значения показателей плавности хода вагонов поезда представлены на графиках на рис. 12 и 13 соответственно.



**Рис. 12.** Результаты расчета показателя плавности хода (в горизонтальном направлении) вагонов поезда при его движении в кривой радиусом 10 000 м

**Fig. 12.** The results of calculating the smoothness index in the horizontal direction of the train wagons when moving in a curve with a radius of 10 000 m



**Рис. 13.** Результаты расчета показателя плавности хода (в вертикальном направлении) вагонов поезда при его движении в кривой радиусом 10 000 м

**Fig. 13.** The results of calculating the smoothness index in the vertical direction of the train wagons when moving in a curve with a radius of 10 000 m

Анализ результатов расчета показателей плавности хода вагонов поезда показал, что при движении поезда в кривой радиусом 10 000 м рост осевой нагрузки с 17 до 18 тс не оказывает значительного воздействия на плавность хода, в вертикальном направлении наблюдается снижение значения в среднем на 2 %, в горизонтальном направлении прослеживается увеличение параметра в среднем на 2 %.

## Заключение

Изменение статической осевой нагрузки в поезде меняет силы во взаимодействии колес с рельсами при его движении, что влияет на динамические качества вагонов, их воздействие на железнодорожный путь, темпы износа колес и рельсов, расходы электроэнергии и пр.

В работе исследовано влияние изменения статической осевой нагрузки в высокоскоростном поезде (на базе электропоезда «Сапсан») с 17 до 18 тс при его движении по прямым и кри-

вым участкам пути на силы, возникающие в системе «колесо – рельс», а также на дополнительные показатели по стандартам [18, 19] – рамные силы, динамическую погонную нагрузку.

Результатами компьютерного моделирования отдельно моторного и немоторного вагонов установлено, что рост статической осевой нагрузки в 5,5 % (с 17 до 18 тс) приводит к существенному росту боковых (до 50 %, наибольшее увеличение наблюдается в кривых участках пути) и вертикальных сил (до 12 % в контакте колес с рельсами). Динамическая погонная нагрузка увеличивается до 6 %, рамные силы – не имеют явного характера роста.

При исследовании сил в системе «колесо – рельс» для вагонов в составе поезда и движении в кривой радиусом 10 000 м в ней наблюдается увеличение продольных, боковых и вертикальных сил до 10 % и незначительное изменение (в среднем 2 %) показателей плавности хода.

## Список литературы

1. Пономарев Ю.Ю., Радченко Д.М. Оценка эффектов развития высокоскоростного железнодорожного сообщения: мировой опыт и перспективы России // Проблемы прогнозирования. 2023. № 1 (196). С. 182–192.
2. Валинский О.С., Киселёв И.П. Научное обеспечение проектирования и строительства высокоскоростных железнодорожных магистралей. Хроника развития компетенций высокоскоростного железнодорожного транспорта в России. // BRICS Transport. 2024. Vol. 3. Iss. 1. DOI: 10.46684/2024.1.4.
3. Киселёв И.П., Бушуев Н.С., Шульман Д.О. Высокоскоростные железные дороги в странах БРИКС // BRICS Transport. 2023. Vol. 2. Iss. 4. DOI: 10.46684/2023.4.6.
4. Atlas High-Speed Rail 2024 // UIC : сайт. URL : [https://uic.org/IMG/pdf/uic\\_high-speed\\_atlas\\_2024.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/uic_high-speed_atlas_2024.pdf) (дата обращения: 21.05.2025).
5. Watson I. High-Speed Railway // Encyclopedia. 2021. Vol. 1. Iss. 3. P. 665–688.
6. Commission Implementing regulation (EU) 2023/1694 of 10 August 2023 // EUR-Lex : сайт. URL : [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2023/1694/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1694/oj) (дата обращения: 21.05.2025).
7. Моделирование динамики железнодорожных экипажей : руководство пользователя // Universal mechanism : сайт. URL : [http://www.umlub.ru/download/90/rus/08\\_um\\_loco.pdf](http://www.umlub.ru/download/90/rus/08_um_loco.pdf) (дата обращения: 21.05.2025).

8. Харитонов А.В. Динамическая модель скоростного электропоезда и ее верификация // Известия Транссиба. 2023. № 2 (54). С. 29–42.
9. Сравнительный анализ конструкций ходовой части и основных технических характеристик скоростных и высокоскоростных электропоездов, эксплуатируемых на железных дорогах России / И.В. Волков, Ю.П. Смачный, А.С. Домников и др. // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2013. № 2. С. 18–22.
10. Моделирование по оценке влияния на комфорт пассажира параметров подвижного состава и железнодорожного пути (разного профиля колеса и головки рельса подвижного состава и локомотивов), режима ведения поезда и установленных скоростей движения поездов, и других местных особенностей участка (спуски/подъёмы, разные кривые и возвышения, в том числе предельных значениях параметров пути и подвижного состава) : научно-технический отчет по ДК № 1727 от 21 сентября 2023 г. : утв. Генеральным директором – председателем правления ОАО «РЖД» О.В. Белозёровым. М. : АО «ВНИИЖТ», 2024. 194 с.
11. Математическое моделирование процессов взаимодействия поездов типа Velaro RUS (Сапсан) и Desiro RUS200 (Ласточка) с рельсом, смонтированным на железнодорожной эстакаде для ремонта подвижного состава, и оценка напряженно-деформированного состояния конструкции пути от действия нагрузок от поездов : отчёт о науч.-исслед. работе / Ю.П. Бороненко, В.И. Федорова, А.Н. Комарова и др. СПб. : ПГУПС, 2023. 84 с.
12. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс. Т. 1 / И.П. Киселёв, Л.С. Блажко, М.Я. Брынь и др. М. : УМЦ ЖДТ, 2018. 428 с.
13. Высокоскоростные поезда «Сапсан» В1 и В2 / под ред. А.В. Ширяева. М. : ОАО «РЖД», 2013 522 с.
14. Пат. 2441762 Рос. Федерация. Профиль поверхности железнодорожного колеса / В.В. Кочергин, И.Н. Максимов, Г. Грабнер. № 2011108019/11 ; заявл. 02.03.2011 ; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4. 22 с.
15. Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1) : специальные технические условия : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 15.04.2024 № 647 (с изменением №1).
16. Об утверждении СТО РЖД 14.004-2025 «Инфраструктура высокоскоростного железнодорожного транспорта. Технические нормы и требования к проектированию и строительству» : распоряжение ОАО «РЖД» от 04.04.2025 № 747/р
17. Проектная документация «Создание высокоскоростной железнодорожной магистрали Санкт-Петербург – Москва». Часть 4. Железнодорожный путь. Верхнее строение пути. Книга 1. Верхнее строение пути без балласта. Текстовая часть. 960-07-1356-ТКР4.1 Том 3.4.1. М., 2024. 99 с.
18. ГОСТ 34093-2017 Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам. Введ. 2018–01–01. М. : Стандартиформ, 2017. 44 с.
19. ГОСТ 34759-2021 Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 2018–01–01. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 31 с.
20. ОСТ 24.050.16-85 Вагоны пассажирские. Методика определения плавности хода. Введ. 1987–01–01. 16 с. // Библиотека нормативной документации : сайт. URL : <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293832/4293832011.pdf> (дата обращения 18.07.2025).

## References

1. Ponomarev Yu.Yu., Radchenko D.M. Otsenka effektiv razvitiya vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo soobshcheniya: mirovoi opyt i perspektivy Rossii [Assessment of the effects of high-speed rail development: global experience and prospects of Russia]. Problemy prognozirovaniya [Forecasting problems], 2023, no 1 (196). pp. 182–192.
2. Valinskii O.S., Kiselev I.P. Nauchnoe obespechenie proektirovaniya i stroitel'stva vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralei. Khronika razvitiya kompetentsii vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta v Rossii. [Scientific support for the design and construction of high-speed railway lines. Chronicle of the Development of Competencies for High-Speed Railway Transport in Russia]. BRICS Transport, 2024, Vol. 3, iss. 1. DOI: 10.46684/2024.1.4.
3. Kiselev I.P., Bushuev N. S., Shul'man D.O. Vysokoskorostnye zheleznye dorogi v stranakh BRIKS [High-Speed Railways in the BRICS Countries]. BRICS Transport, 2023, Vol. 2, iss. 4. DOI: 10.46684/2023.4.6.
4. Atlas High-Speed Rail 2024. Available at: [https://uic.org/IMG/pdf/uic\\_high-speed\\_atlas\\_2024.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/uic_high-speed_atlas_2024.pdf) (Accessed May 21, 2025).
5. Watson I. High-Speed Railway // Encyclopedia, 2021, Vol. 1, iss. 3, pp. 665–688.
6. Commission Implementing regulation (EU) 2023/1694 of 10 August 2023. Available at: [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2023/1694/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1694/oj) (Accessed May 21, 2025).
7. Universal'nyi mekhanizm 9. Modelirovanie dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhei. Rukovodstvo pol'zovatelya [Universal mechanism 9. Modeling the dynamics of railway crews. User manual]. Available at: [http://www.umlub.ru/download/90/rus/08\\_um\\_loco.pdf](http://www.umlub.ru/download/90/rus/08_um_loco.pdf) (Accessed May 21, 2025).
8. Kharitonov A. V. Dinamicheskaya model' skorostnogo elektropoyezda i ee verifikatsiya [Dynamic model of a high-speed electric train and its verification]. Izvestiya Transsiba [Bulletins of Transsib], 2023, no 2 (54), pp. 29–42.
9. Volkov I.V., Smachnyi Yu.P., Domnikov A.S., Smachnyi V.Yu. Sravnitel'nyi analiz konstruktivnykh kharakteristik skorostnykh i vysokoskorostnykh elektropoyezdov, ekspluatiruemyykh na zheleznikh dorogakh Rossii [Comparative analysis of running gear designs and basic technical characteristics of high speed electric trains operated on Russian railways]. Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of the Rostov State Transport University], 2013, no 2, pp. 18–22.
10. Nauchno-tehnicheskii otchet po ДК № 1727 от 21 sentyabrya 2023 g. «Modelirovanie po otsenke vliyaniya na komfort passazhira parametrov podvijnogo so-stava i zheleznodorozhnogo puti (raznogo profilya koleasa i golovki rel'sa podvijnogo sostava i lokomotivov), rezhima vedeniya poezda i ustanovlennykh skorostei dvizheniya poezdov, i drugih mestnykh osobennostei uchastka (spuski/pod''emy, raznye krivye i vozvysheniya, v tom chisle predel'nykh znacheniyakh parametrov puti i

podvizhnogo sostava)» [Scientific and technical report on DK №. 1727 of September 21, 2023 «Modeling to assess the impact on passenger comfort of rolling stock and railway track parameters (different wheel and rail head profiles of rolling stock and locomotives), train operation mode and established train speeds, and other local features of the section (descents/ascents, various curves and elevations, including the limit values of track and rolling stock parameters)»]. Moscow: VNIIZhT Publ., 2024. 194 p.

11. Boronenko Yu.P., Fedorova V.I., Komarova A.N., Ovchinnikov D.V. Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote «Matematicheskoe modelirovanie protsessov vzaimodeistviya poezdov tipa Velaro RUS (Sapsan) i Desiro RUS200 (Lastochka) s rel'som, smontirovannym na zheleznodorozhnoi estakade dlya remonta podvizhnogo sostava, i otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktssii puti ot deistviya nagruzok ot poezdov» [Report on the research work «Mathematical modeling of the interaction of trains of the Velaro RUS (Sapsan) and Desiro RUS200 (Swallow) type with a rail mounted on a railway overpass for the repair of rolling stock, and assessment of the stress-strain state of the track structure from the action of loads from trains»]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2023. 84 p.

12. Kiselev I.P., Blazhko L.S., Bryn' M.Ya., Burkov A.T., Bushuev N.S., Gapanovich V.A., D'yachenko L.K., Zakharov V.B., Kitunin A.A., Kolos A.F., Kostenko V.V., Ledyayev A.P., Mizintsev A.V., Nikitin A.B., Panychev A.Yu., Plekhanov P.A., Romanov A.V., Rybin P.K., Savvov V.M., Seronosov V.V., Smirnov V.N., Sokolov Yu.I., Titova T.S., Frolov Yu.S., Shkurnikov S.V. Vysokoskorostnoi zheleznodorozhnyi transport. Obshchii kurs. T. 1 [High-speed rail transport. General course. Vol. 1]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2018. 428 p.

13. Vysokoskorostnye poezda «Sapsan» B1 и B2 [High-speed trains «Sapsan» B1 and B2]. Moscow: RZhD Publ., 2013. 522 p.

14. Kochergin V.V., Maksimov I.N., Grabner G. Patent RU 2441762 C1, 10.02.2012.

15. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 15.04.2024 № 647 «Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya «Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya vysokoskorostnoi zheleznodorozhnoi magistrali Moskva – Sankt-Peterburg (VSZhM-1)» (s izmeneniem №1) [Order of JSC «Russian Railways» dated April 15, 2024 No 647 «Special technical conditions «Design, construction and operation of the Moscow – Saint Petersburg high-speed railway (VSZHM-1)» (with amendment No 1)].

16. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 04.04.2025 № 747/r «Ob utverzhdenii STO RZhD 14.004-2025 «Infrastruktura vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta. Tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitel'stvu» [Order of JSC «Russian Railways» dated April 4, 2025 No 747/r «On the approval of STO RZD 14.004-2025 «Infrastructure of high-speed rail transport. Technical standards and requirements for design and construction»].

17. Proektnaya dokumentatsiya «Sozдание vysokoskorostnoi zheleznodorozhnoi magistrali Sankt-Peterburg – Moskva». Chast' 4. Zheleznodorozhnyi put'. Verkhnee stroenie puti. Kniga 1. Verkhnee stroenie puti bez ballasta. Tekstovaya chast'. 960-07-1356-TKR4.1 Tom 3.4.1 [Project documentation «Creation of the Saint Petersburg – Moscow high-speed railway». Part 4. Railway track. The upper structure of the track. Book 1. The upper structure of the track without ballast. The text part. 960-07-1356-TKR4. Vol. 1, 3.4.1]. Moscow, 2024. 99 p.

18. GOST 34093-2017 Vagony passazhirskie lokomotivnoi tyagi. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [State Standard 34093-2017 Passenger wagons on locomotive traction. Requirements for structural strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2017. 44 p.

19. GOST 34759-2021 Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeistviya na zheleznodorozhnyi put' i metody ispytaniy [State Standard 34759-2021 Railway rolling stock. Normative limits of railway track interaction and test methods]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 31 p.

20. OST 24.050.16-85 Vagony passazhirskie. Metodika opredeleniya pлавности khoda [Industry standard 24.050.16-85 Passenger wagons. The method of determining the smoothness of the ride]. 16 p.

### Информация об авторах

**Саидова Алина Викторовна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: av-saidova@yandex.ru.

**Федорова Вероника Игоревна**, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела проблем эксплуатации и предиктивной аналитики путевой инфраструктуры (пути), научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва; e-mail: nika.veronika-fedorova@yandex.ru.

**Комарова Анна Николаевна**, кандидат технических наук, главный специалист отдела проблем эксплуатации и предиктивной аналитики путевой инфраструктуры (пути), научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва; e-mail: an-komarova@mail.ru.

**Семенова Анастасия Сергеевна**, ведущий инженер отдела проблем эксплуатации и предиктивной аналитики путевой инфраструктуры (пути), научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва; e-mail: nas-semenova00@mail.ru.

### Information about the authors

**Alina V. Saidova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Saint Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: av-saidova@yandex.ru.

**Veronika I. Fedorova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Problems of operation and Predictive Analytics of Track Infrastructure (Track), Scientific Research Institute of Railway Transport, Moscow; e-mail: nika.veronika-fedorova@yandex.ru.

**Anna N. Komarova**, Ph.D. in Engineering Science, main expert of the Department of Problems of operation and Predictive Analytics of Track Infrastructure (Track), Scientific Research Institute of Railway Transport, Moscow; e-mail: an-komarova@mail.ru.

**Anastasiya S. Semenova**, Lead engineer of the Department of Problems of operation and Predictive Analytics of Track Infrastructure (Track), Scientific Research Institute of Railway Transport, Moscow; e-mail: nas-semenova00@mail.ru.

## Проблемы организации радиотракта на участке высокоскоростной железнодорожной магистрали

С.М. Куценко<sup>1</sup>✉, Д.С. Чинаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

✉kutsenko@pgups.ru

### Резюме

Реализация столь масштабного мероприятия как проектирование и строительство высокоскоростной магистрали не может быть осуществлена без средств связи. Несомненно, что в таком случае должны применяться самые современные средства связи, удовлетворяющие как с точки зрения эксплуатации инфраструктурных объектов и подвижного состава, так и обслуживания пассажиров. В России еще никогда массово в эксплуатационном режиме не обеспечивали сотовой связью подвижные объекты, перемещающиеся на скоростях от 250 до 400 км/ч. Естественно, радиотракт в этом случае необходимо реализовывать на современном стандарте сотовой связи LTE. Таким образом, проведение анализа основных факторов, влияющих на установление устойчивой связи на всем участке высокоскоростной магистрали, является актуальной задачей. В результате исследования определены проблемные вопросы для организации беспроводной связи при высоких скоростях движения (свыше 250 км/ч), такие как эффект Доплера, уровень сигнала, процесс обслуживания мобильных абонентов при переходе их от одной базовой станции к другой во время вызова или передаче информационных сообщений (хэндовер), а также анализ существующих решений реализации этих процессов ведущими российскими и всемирно известными производителями оборудования сетей 5G стандарта LTE. Практическая значимость исследования заключается в выработанных рекомендациях при управлении сетью связи на железнодорожном транспорте, а именно использование совместных ячеек между ближайшими ячейками сотовой связи посредством их объединения в одну логическую ячейку.

### Ключевые слова

сети сотовой связи, стандарт 5G, стандарт LTE, радиотракт, высокоскоростные железнодорожные магистрали, хэндовер, логическая ячейка

### Для цитирования

Куценко С.М. Проблемы организации радиотракта на участке высокоскоростной железнодорожной магистрали / С.М. Куценко, Д.С. Чинаров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 31–39. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).31-39.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 26.08.2025 г.; поступила после рецензирования: 04.09.2025 г.; принята к публикации 05.09.2025 г.

## Problems of organizing of a radiotrack on a section of a high-speed railway line

S.M. Kutsenko<sup>1</sup>✉, D.S. Chinarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, the Russian Federation

<sup>2</sup>LCC «RPF Berkut», Saint Petersburg, the Russian Federation

✉kutsenko@pgups.ru

### Abstract

Implementation of such a large-scale project as the design and construction of a high-speed railway cannot be carried out without communication facilities. Undoubtedly, such a project should use the most modern communication facilities that satisfy both the operation of infrastructure facilities and rolling stock, and directly passengers. In Russia, mobile objects have never been provided with cellular communications in operational mode at speeds from 250 to 400 km/h. Naturally, the radio path in this case must be implemented on the currently modern LTE cellular communication standard. In this regard, conducting an analysis of the main factors influencing the organization of stable communications along the entire section of the high-speed railway is an urgent task. The results of the study are the definitions of problematic issues for organizing wireless communications at high speeds (over 250 km/h), such as the Doppler effect, signal level, the process of servicing mobile subscribers when transmitting them from one base station to another during a call or when transmitting information messages (handover) and the analysis of existing solutions for the implementation by leading Russian and world-famous manufacturers of 5G LTE network equipment. The practical significance of the study lies in the developed recommendations for organizing the management of a communication net-



work in rail transport, namely, using joint cells between the nearest cellular cells by combining them into one logical cell.

### Keywords

cellular networks, 5G standard, LTE standard, radio track, high-speed railways, handover, logical cell

### For citation

Kutsenko S.M., Chinarov D.S. Problemy organizatsii radiotrakta na uchastke vysokoskorostnoi zheleznodorozhnoi magistrali [Problems of organizing of a radiotrack on a section of a high-speed railway line]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. № 3(87). Pp. 31–39. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87)31-39.

### Article Info

Received: August 26, 2025; Revised: September 4, 2025; Accepted: September 5, 2025.

### Введение

В настоящий момент в России реализуется масштабный проект – строительство высокоскоростной магистрали (ВСМ), который позволит вывести сервис пассажирских перевозок на новый уровень. Одним из важных компонентов в предоставлении сервиса пассажирам, а также для управления поездом является надежный доступ к широкополосной системе связи. Не секрет, что на высоких скоростях существует проблема качественной беспроводной связи. Факторов, снижающих полезный уровень сигнала, много: многолучевое распространение радиоволн; эффект Доплера (для высоких скоростей); электромагнитные помехи и др. Существующие решения, применяемые на сети железных дорог компании ОАО «РЖД» для организации технологической связи, такие как радиостанции Ижевского радиозавода РС-46МЦ (диапазон гектометровых волн 2,130 и 2,150 МГц и метровых волн от 151,725 до 156 МГц) [1], радиостанции КБ Пульсар-Телеком (г. Пенза) РЛСМ-10 [2], поддерживающих стандарты DMR, GSM, радиостанции, поддерживающие стандарт TETRA на высоких скоростях, не апробированы. Известные технологические ограничения перечисленных радиостанций и стандартов и заявленные высокие требования к скорости передачи информации на проектируемом объекте не позволяют использовать существующие решения, а требования к показателям качества обслуживания, например таким как скорость передачи данных, коэффициент битовых ошибок, задержка при передаче информации и т.д., весьма высокие [3].

Кроме технологических аспектов необходимы и решения для пассажиров. Уже в ближайшем будущем мы все будем повсеместно пользоваться стандартом 5G. Более того, современные телекоммуникационные компании

(например, всемирно известная компания Huawei или российский научно-технический центр «Протей» [4]) уже разрабатывают решения с применением стандарта 5G, а, следовательно, логично, что новая система беспроводной связи будет построена на оборудовании 5G.

В связи с указанными требованиями возрастает ответственность столь масштабного строительства сети технологической связи, которое на многие годы будет определять тенденции ее (технологической связи) развития для эксплуатации инфраструктурных объектов и подвижного состава. Более того, данная технология позволяет реализовывать уже нарабатываемые решения по беспилотному управлению локомотивом.

Несмотря на то, что уже существуют переломные решения по данному вопросу, есть еще много «белых пятен», которые будут изложены в настоящем исследовании. В статье проанализированы проблемные вопросы при организации беспроводной связи на ВСМ, такие как уровень сигнала, эффект Доплера и работа хэндовера, а также изложено собственное видение авторов для решения обозначенных проблем.

Целью данного исследования является проведение анализа основных факторов, влияющих на организацию устойчивой связи на всем участке железнодорожного пути и выработка практических решений по реализации поставленных задач.

### Материалы и методы

Методология исследования основана на изучении научной литературы, материалов СМИ, презентационных материалов со всемирных выставок и конференций. В статье использованы такие методы, как системный подход, обобщение, анализ. Проведенный анализ основывается на сравнении существующих методов

организации сетей беспроводной связи на железных дорогах России и мира с действующими в настоящее время современными решениями и идеями для организации беспроводной связи на высокоскоростных магистралях. Также в работе проведено обобщение основных проблемных вопросов, влияющих на организацию беспроводной связи.

### Проблемные вопросы

При организации беспроводной передачи информации с применением сотовой связи (данная технология большинством разработчиков радиотрактов на железной дороге принята как основной вектор развития [4, 5]) необходимо решить следующие задачи:

- обеспечить приемлемую пропускную способность и надежность;
- минимизировать задержку при передаче информации;
- учесть экономический эффект (капиталовложения и эксплуатационные затраты).

Далее обсудим ряд факторов, влияющих на реализацию столь масштабного проекта.

**Эффект Доплера.** Данный эффект оказывает существенное влияние на уровень сигнала при движении объекта на высоких скоростях.

Влияние эффекта может провоцировать искажение принимаемого радиосигнала, что, в свою очередь, может привести к ошибкам при передаче информации. На рис. 1 приведена демонстрация эффекта. Если подвижный объект (подвижной состав) движется к неподвижному объекту (базовой станции), то наблюдается увеличение значения смещения частот относительно исходного сигнала (рис. 1, а). В противном случае смещение уменьшается (рис. 1, б).

На смещение частот также влияет и угол распространения радиоволн:

$$f_d = \frac{f}{c \cdot V \cdot \cos \alpha},$$

где  $c$  – скорость света;  $V$  – скорость подвижного состава;  $\alpha$  – угол между направлением подвижного объекта и направлением распространения радиоволн (рис. 2).

В настоящий момент в России только строится полигон для ВСМ и натурных экспериментов оценки эффекта Доплера для подвижного состава нет. В мире подобные оценки проведены. Например, авторы статьи [6] опубликовали результаты исследований характеристик распространения радиоволн на участке ВСМ «Гуанчжоу – Шэньчжэнь» в окрестности диапазона частот 2,4 ГГц. Полученные резуль-

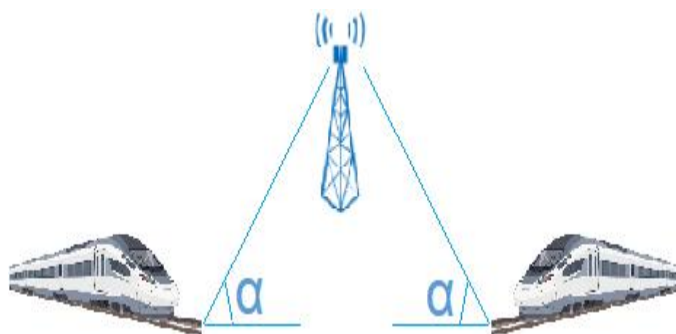


**Рис. 1.** Демонстрация эффекта Доплера ( $f$  – исходная частота,  $f_d$  – частота, регистрируемая неподвижным приемником):

увеличение (а) и уменьшение (б) значения смещения частот относительно исходного сигнала

**Fig. 1.** Demonstration of the Doppler effect ( $f$  – original frequency;  $f_d$  – frequency recorded by a stationary receiver):

increase (a) and reducing (b) in the frequency offset value of the relative source signal



**Рис. 2.** Влияние угла распространения радиоволн на значение смещения частоты

**Fig. 2.** The influence of the propagation angle of radio waves on the frequency shift value

таты они разделили на четыре вида в зависимости от рельефа местности (на данном участке железной дороги преобладает холмистая местность). Для каждого из четырех участков авторы предлагают разработать специальный радиоинтерфейс, учитывающий характеристики задержки и доплеровский сдвиг. Еще один пример: компания Huawei в своих технических решениях предлагает учитывать смещения частоты путем специального алгоритма (так называемая двухинтервальная оценка исходя из отклонения от кварцевого (эталонного) генератора). Принятие во внимание эффекта Доплера – это большой успех для реализации качественной передачи информации, но все же требуются эксперименты, тем более помимо эффекта Доплера на качественную передачу информации влияют и другие факторы.

**Уровень сигнала.** Для уверенного приема сигнала и обеспечения заявленной пропускной способности каналов связи одним из ключевых факторов для организации устойчивой связи является определение оптимального количества

базовых станций (рис. 3). Принимая во внимание разные источники, можно сделать общий вывод, согласно которому оптимальным считается расстояние от 1,5 до 3 км (диапазон зоны покрытия или диапазон соты) [3–5, 7–9].

В этом случае стоимость проекта зависит от количества базовых станций.

Помимо мощности излучателя, размещенного на базовой станции, на уровень сигнала (или отношение сигнал/шум, или сигнал/помеха) влияет многолучевое распространение радиоволн (рис. 4), где между передатчиком и приемником, помимо прямого луча ( $d1$ ), распространяется посредством переотражения от препятствий и отраженный луч ( $d2$ ). Этот важный фактор может существенно снижать уровень полезного сигнала и, как следствие, влиять на пропускную способность в канале связи. Для уменьшения влияния необходимо учитывать размещение инфраструктурных объектов и тщательно настраивать антенно-фидерные устройства базовых станций.

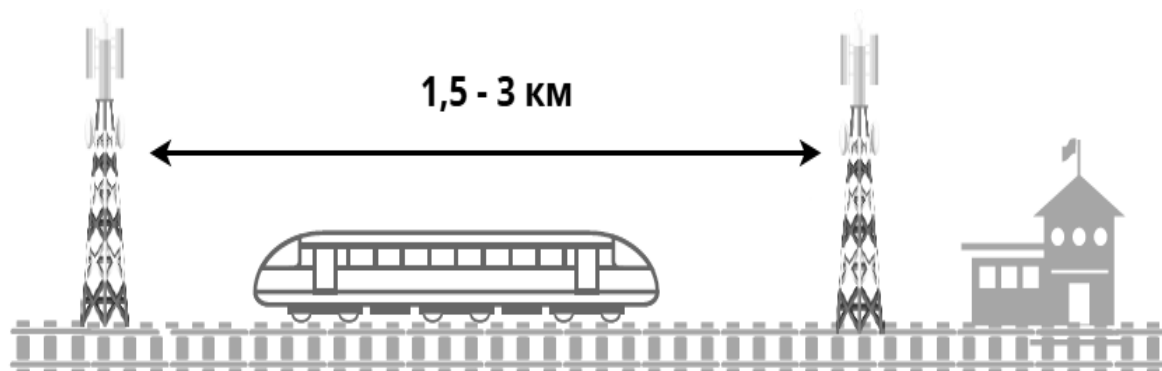


Рис. 3. Определение оптимального расстояния между базовыми станциями

Fig. 3. Determining the optimal distance between base stations

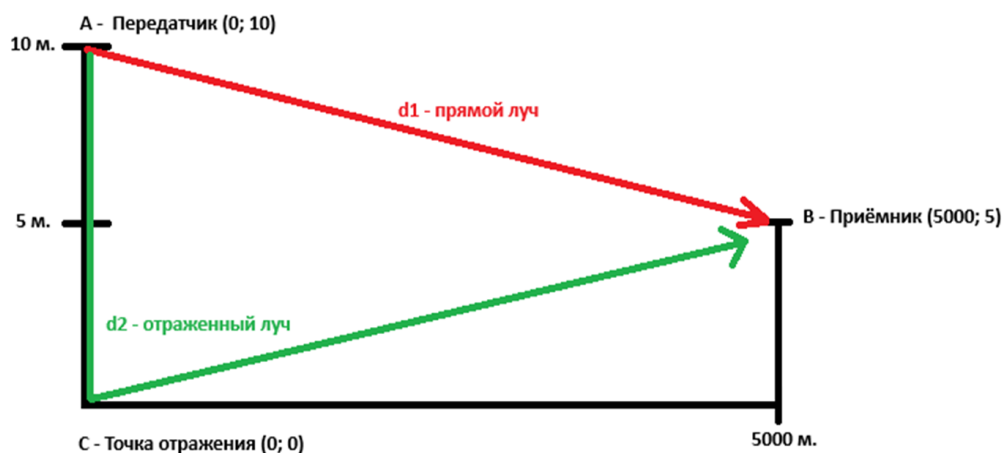


Рис. 4. Демонстрация эффекта многолучевого распространения радиоволн

Fig. 4. Demonstration of the effect of multipath propagation of radio waves

Примером новых решений в части проектирования антенн для реализации стандарта LTE может служить источник [9].

Кроме перечисленных факторов на уровень сигнала также существенно влияют взаимные помехи между действующим оборудованием и общедоступными сетями связи [3]. Взаимные помехи могут привести к кратковременным потерям голосовой связи и передачи данных на нескольких сотнях метрах участка пути. Устранить взаимные помехи весьма не просто, так как общедоступные операторы связи применяют практически те же самые частотные полосы. Уменьшить влияние возможно только при экспериментальной настройке оборудования и проведении постоянного мониторинга уровня сигнала.

*Хэндовер.* Еще один важный фактор, непосредственно влияющий на скорость передачи данных для подвижных объектов, это хэндовер – процесс передачи обслуживания абонента от одной базовой станции к другой во время вызова или сеанса передачи данных (т.е. при «активном» абоненте). Вообще, решение проблемы времени на переключение от одной базовой станции к другой – это инженерные настройки системы, но даже при существующих скоростях движения возникает эффект кратковременной потери сигнала.

Оригинальным решением является создание совместной ячейки между ближайшими ячейками сотовой связи, предложенное Huawei (рис. 5).

Предлагаемое на рис. 5 объединение нескольких физических ячеек в одну логическую ячейку позволит повысить устойчивость связи, осуществить бесшовное переключение каналов, а также повысить эффективность применения алгоритмов для учета раннего и позднего хэндовера, расчеты которых приведены в [10].

## Результаты

Обозначенные проблемные вопросы можно решить только комплексными мерами. Для повышения эффективности управления сетями связи на железной дороге, осуществления мониторинга базовых станций и мобильных устройств, их оперативного управления предлагается структурная схема (рис. 6).

Сигналы управления и контроля должны передаваться посредством сетей передачи данных (СПД) дирекции связи ОАО «РЖД» (на схеме рис. 6 сеть СПД реализуется посредством мультиплексоров), что позволит диспетчерам полностью контролировать весь процесс. Все сигналы должны агрегировать в устройство SG (шлюз в сети LTE) с передачей информации на сервер, с которого, в свою очередь, пользователи будут использовать полученные данные по необходимости. Для увеличения зоны контроля и управления на десятки и сотни километров предлагается использовать совместную логическую ячейку сотовой связи, что, несомненно, позволит повысить эффективность управления на железной дороге устройствами связи. Управлять диспетчерам подвижным составом при таком решении будет проще и легче. С подобным решением можно провести аналогию развития диспетчерской централизации, а именно внедрение единых диспетчерских центров управлений в 1990–2000-х гг. на сети железных дорог. Важно определиться с необходимым и достаточным количеством диспетчеров по управлению и мониторингу устройств связи. В современную эпоху цифровых технологий предлагается дополнить схему, представленную на рис. 5: добавить функцию управления ячейками сотовой сети связи алгоритмами искусственного интеллекта (ИИ), а также дополнительно собирать информацию о точном местоположении подвижного состава Глонасс-приемниками по рельсовым

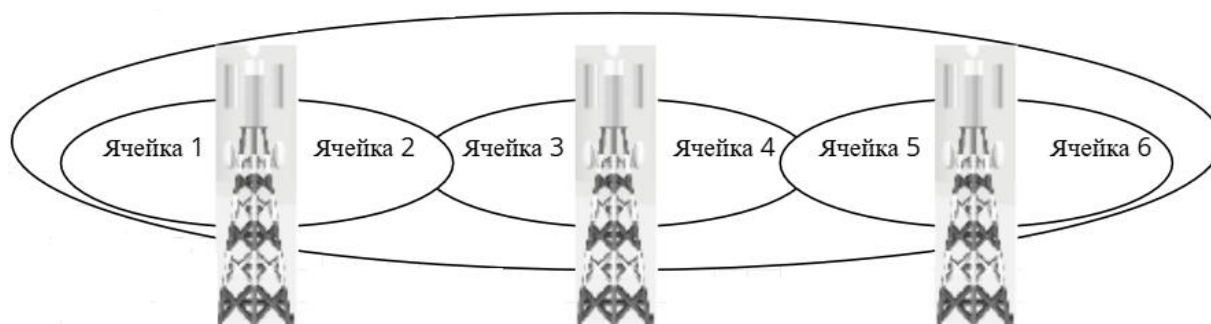
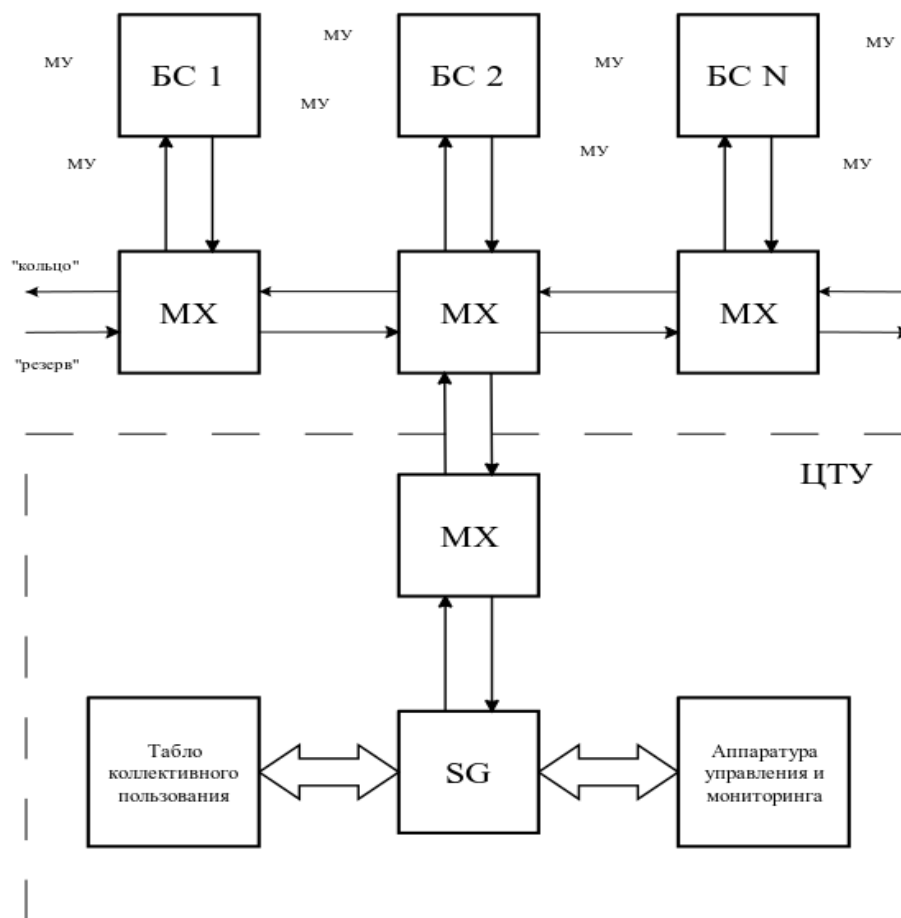


Рис. 5. Совместная логическая ячейка  
Fig. 5. Joint logic cell



**Рис. 6.** Структурная схема управления и мониторинга базовыми станциями:

*BC* – базовая станция; *MV* – мобильные устройства; *MX* – мультиплексор;  
*SG* – serving gateway, шлюз в сети LTE; *ЦТУ* – центр технического управления

**Fig. 6.** Structural diagram of control and monitoring of base stations:

*BC* – base station; *MV* – mobile devices; *MX* – multiplexer;  
*SG* – serving gateway, gateway in the LTE network; *ЦТУ* – technical control center

цепям [11]. В этом случае ИИ позволит оперативно проводить мониторинг местоположения подвижного состава даже в случае кратковременной потери сигнала, вызванной внешними помехами и высокой скоростью.

Реализация алгоритма совместной логической ячейки невозможна без применения современных методов организации хэндовера. Предлагается использовать идею подканалов, изложенных в патенте [12], где при переходе мобильного устройства из одной соты в другую связь с исходной базовой станцией будет поддерживаться по дополнительному каналу (подканалу) и переключение произойдет лишь в тот момент времени, когда классический алгоритм хэндовера полностью завершит все действия и произойдет переключение мобильного устройства на необходимую (последующую) базовую станцию.

Для учета эффекта Доплера на скоростях свыше 400 км/ч необходимо использовать алгоритм двухинтервальной оценки с учетом отклонения частоты от эталонного генератора. Обеспечение требуемого и достаточного уровня полезного сигнала предлагается достичь путем применения квазимикрополосных антенн [9] либо антенн типа «волновой канал» [4]. Об окончательном решении о местах размещения базовых станций можно судить только после строительства ВСМ, где будет принято во внимание влияние рельефа местности с учетом известной модели распространения радиосигналов Окумуры – Хата [13].

## Заключение

Анализ трех основных проблемных факторов, возникающих при реализации проекта

широкополосной связи на ВСМ позволяет сделать вывод, что решение может быть только комплексным и без реальных испытаний и экспериментов достичь современных требований, заявляемых при реализации сетей 5G, невозможно. В мире уже ведутся разработки в данном направлении. Например, в странах Евросоюза поэтапно внедряется современная система управления движением поездов ETCS (European Train Control System) [5], которая включает в себя и развитие сетей 5G. В других странах (Китай, Малайзия, Нигерия, Ангола, Казахстан и др.) реализуется масштабный проект разработки стандартов будущей системы железнодорожной мобильной связи (Future railway mobile communication system, FRMCS) [7–9, 14]. Дорожные карты при реализации данных проектов предусматривают использование либо только технологии LTE, либо разработку гибридной системы, которая учитывает существующую технологию GSM-R и сети 5G, работающие на LTE. Разрабатываемые отраслевые и международные стандарты предусматривают применение частотного диапазона 1,9–1,915 ГГц. В некоторых странах помимо частоты 1,9 ГГц предлагается использовать частотный диапазон 876–925 МГц.

Внедрение стандарта FRMCS на сети железных дорог происходит совместно с развитием таких технологий, как улучшение позиционирования поездов, совершенствование кибер-

безопасности, сокращение путевых компонентов, развитие технологии интернет-вещей [15], т.е. внедрение FRMCS дает новый импульс развития перечисленных технологий, в том числе и при реализации проекта ВСМ.

С точки зрения помехозащищенности и дальности передачи информации проблемы есть как в том, так и в другом диапазоне [16–18]. Имеется много вопросов к технической реализации антенно-фидерных систем связи, требуются новые типы антенн [9]. Здесь опять же нужен эксперимент, который, помимо технических аспектов, включая рельеф местности и особенности распространения радиоволн между Москвой и Санкт-Петербургом, несомненно, учет и экономику проекта. При проведении эксперимента, безусловно, нужно протестировать различные сценарии железнодорожной связи, учесть требования к трафику сети, оценить такие параметры, как речевая связь для рабочих целей, видеосвязь для целей наблюдения, стандартная и экстренная передача данных и многое другое [19].

При данном анализе не исследовались важные вопросы безопасности передачи информации, которые также окажут влияние на реализацию и стоимость проекта. Также не рассмотрены варианты альтернативной связи (например, спутниковой), но это темы дальнейших изысканий.

### Список литературы

1. Стационарная симплексная радиостанция PC-46МЦ // ООО «ИРЗ» : сайт. URL : <https://www.irz.ru/products/15/133.htm> (Дата обращения 04.06.2025).
2. Радиостанция передачи речи и данных РЛСМ-10 // КБ ПУЛЬСАР-ТЕЛЕКОМ : сайт. URL : <https://www.pulsar-telecom.ru/catalog/radiosvyaz/rlsm-10> (Дата обращения 04.06.2025).
3. High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R / R. He, B. Ai, G. Wang et al. // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2016. Vol. 11. Iss. 3. P. 49–58. DOI 10.1109/MVT.2016.2564446.
4. Решение Private LTE/5G // НТЦ «Протей» : сайт. URL : <https://protei.ru/solutions/private-lte5g> (Дата обращения 04.06.2025).
5. European Train Control System // Digitale Schiene : site. URL : <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/technologies/ETCS> (access date 04.06.2025).
6. Measurement-Based Delay and Doppler Characterizations for High-Speed Railway Hilly Scenario / Y. Zhang, Z. He, W. Zhang et al. // International Journal of Antennas and Propagation. 2014. DOI 10.1155/2014/875345.
7. Pencheva E., Atanasov I., Trifonov V. Identity Management in Future Railway Mobile Communication System // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 9. DOI: 10.3390/app12094293.
8. 5G Based on MNOs for Critical Railway Signalling Services: Future Railway Mobile Communication System / A. González-Plaza, R. Gutiérrez Cantarero, R. Arancibia et al. // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 18. DOI 10.3390/app12189003.
9. Shao J., Li Q., Tan J. Design and Simulation of Quasi-microstrip Yagi Antenna in Railway Mobile Communication // EAI Endorsed Transactions On Scalable Information Systems. 2025. Vol. 12. Iss. 2. DOI 10.4108/eetsis.7029.
10. Дроздова В.Г., Завьялова Д.В. Анализ и оптимизация ключевых показателей эффективности хэндоверов в мобильных сетях LTE // Вестник кибернетики. 2017. № 4 (28). С. 146–153.
11. Сулимин А.Ю., Куценко С.М., Иванов М.А. Использование геопозиционирования объекта для повышения точности работы защиты питающих линий системы тягового электроснабжения // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2024. Т. 21. № 4. С. 954–964.

12. Пат. 2642831 Рос. Федерация. Узел и способ для обеспечения обслуживания беспроводного терминального устройства множеством сот в коммуникационной сети / Ф. Гуннарссон, П. Валлентин, А. Чентонца [и др]. № 2015106987 ; заявл. 17.07.2013 ; опубл. 29.01.2018, Бюл. № 4. 59 с.
13. Ярыгин В.С., Криштофович А.Ю. Исследование распространения сигнала LTE-1800 в условиях плотной городской застройки на основе статистических моделей и экспериментальных данных // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2020. № 8. С. 507–513.
14. Modelling of heterogeneous 5G network slice for smart real-time railway communications / S. Hanczewski, M. Stasiak, J. Weissenberg et al. // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2025. Vol. 22. Iss. 3. P. 2534–2545. DOI 10.1109/TNSM.2025.3547762.
15. 5GRAIL paves the way to the Future Railway Mobile Communication System Introduction / V. Nikolopoulou, D. Mandoc, F. Bazizi et al. // 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). Montreal, 2022. P. 53–57. DOI 10.1109/FNWF55208.2022.00018.
16. Тарасенко А.Ю., Гриценко А.А., Лобеев Д.П. Оптимизация использования частотного спектра // Автоматика, связь, информатика. 2025. №1. С. 9–12.
17. Куценко С.М., Евдокимова О.Г., Климов Н.Н. О регистрации электромагнитных импульсов, оказывающих мешающее воздействие на работу систем обеспечения движения поездов // Eltrans – 2023 : Электрификация и электрическая тяга: цифровая трансформация железнодорожного транспорта : сб. тр. XI Междунар. симпозиума. СПб., 2023. С. 303–311.
18. Method for detecting the source of radio interference affecting train radio communication in the band of 2,13 and 2,15 MHz / S.M. Kutsenko, N.I. Rukavishnikov, O.G. Evdokimova et al. // BRICS Transport. 2023. Vol. 2. Iss. 2. DOI 10.46684/2023.2.4.
19. Тихвинский В., Портной С. Сети мобильной железнодорожной связи FRMCS: перспективы создания и внедрения // Первая миля. 2021. № 3 (95). С. 54–65.

### References

1. Stationarnaya simpleksnaya radiostantsiya RS-46MTs (elektronnyi resurs) [Stationary simplex radio station RS-46MC (electronic resource)]. Available at: <https://www.irz.ru/products/15/133.htm> (Accessed June 4, 2025).
2. Radiostantsiya peredachi rechi i dannykh RLSM-10 (elektronnyi resurs) [Radio station for speech and data transmission RLSM-10 (electronic resource)]. Available at: <https://www.pulsar-telecom.ru/catalog/radiosvyaz/rism-10> (Accessed June 4, 2025).
3. He R., Ai B., Wang G., Guan K., Zhong Z., Molisch A.F. High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R // IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, Vol. 11, iss. 3, pp. 49–58.
4. Kompleksnoe reshenie Private LTE/5G «pod klyuch» (elektronnyi resurs) [A comprehensive Private LTE/5G turnkey solution (electronic resource)]. Available at: <https://protei.ru/solutions/private-lte5g> (Accessed June 4, 2025).
5. European Train Control System (electronic resource). Available at: <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/technologies/ETCS> (Accessed June 4, 2025).
6. Zhang Y., He Z., Zhang W., Xiao L., Zhou S. Measurement-Based Delay and Doppler Characterizations for High-Speed Railway Hilly Scenario // International Journal of Antennas and Propagation. 2014. DOI: 10.1155/2014/875345.
7. Pencheva E., Atanasov I., Trifonov V. Identity Management in Future Railway Mobile Communication System // Applied Sciences, 2022, Vol. 12, iss. 9. DOI: 10.3390/app12094293.
8. González-Plaza A., Gutiérrez Cantarero R., Briso Rodríguez C. 5G Based on MNOs for Critical Railway Signalling Services: Future Railway Mobile Communication System // Applied Sciences, 2022, Vol. 12, iss. 18. DOI <https://doi.org/10.3390/app12189003>.
9. Shao J., Li Q., Tan J. Design and Simulation of Quasi-microstrip Yagi Antenna in Railway Mobile Communication // EAI Endorsed Transactions On Scalable Information Systems, 2025, Vol. 12, iss. 2. DOI <https://doi.org/10.4108/eetis.7029>.
10. Drozdova V.G., Zav'yalova D.V. Analiz i optimizatsiya klyuchevykh pokazatelei effektivnosti khendoverov v mobil'nykh setyakh LTE [Analysis and optimization of key performance indicators of handovers in LTE mobile networks]. *Vestnik kibernetiki* [Bulletin of Cybernetics], 2017, no 4 (28), pp. 146–153.
11. Sulimin A.Yu., Kutsenko S.M., Ivanov M.A. Ispol'zovanie geopozitsionirovaniya ob'ekta dlya povysheniya tochnosti raboty zashchity pitayushchikh linii sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [The use of object geo-positioning to improve the accuracy of protection of supply lines of traction power supply system]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Petersburg State Transport University], 2024, Vol. 21, no 4, pp. 954–964.
12. Gunnarsson F., Vallentin P., Chentontsa A., Teyib O., Vager S., Yokhansson N. Patent RU 2642831 C1, 29.01.2018.
13. Yarygin V.S., Krishtofovich A.Yu. Issledovanie rasprostraneniya signala LTE-1800 v usloviyakh plotnoi gorodskoi zas-troiki na osnove statisticheskikh modelei i eksperimental'nykh dannykh [Investigation of LTE-1800 signal propagation in conditions of dense urban development based on statistical models and experimental data]. *Informatsionnye tekhnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii* [Information Technologies. Radio electronics. Telecommunications], 2020, no 8, pp. 507–513.
14. Hanczewski S., Stasiak M., Weissenberg J., Weissenberg M. Modelling of heterogeneous 5G network slice for smart real-time railway communications // IEEE Transactions on Network and Service Management, 2025, Vol. 22, iss. 3, pp. 2534–2545. DOI: 10.1109/TNSM.2025.3547762.
15. Nikolopoulou V., Mandoc D., Bazizi F. et al. 5GRAIL paves the way to the Future Railway Mobile Communication System Introduction // 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). Montreal, 2022, pp. 53–57. DOI 10.1109/FNWF55208.2022.00018.
16. Tarasenko A.Yu., Gritsenko A.A., Lobeev D.P. Optimizatsiya ispol'zovaniya chastotnogo spektra [Optimization of the use of the frequency spectrum]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, Informatics], 2025, no 1, pp. 9–12.

17. Kutsenko S.M., Evdokimova O.G., Klimov N.N. O registratsii elektromagnitnykh impul'sov, okazyvayushchikh meshayushchee vozdeystvie na rabotu sistem obespecheniya dvizheniya poezdov [On the registration of electromagnetic pulses that interfere with the operation of train propulsion systems]. *Sbornik trudov XI Mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans – 2023: Elektrifikatsiya i elektricheskaya tyaga: tsifrovaya transformatsiya zheleznodorozhnogo transporta»* [Proceedings of the XI International Symposium «Eltrans – 2023 : Electrification and electric traction: digital transformation of railway transport»]. Saint Petersburg, 2023, pp. 303–311.

18. Kutsenko S.M., Rukavishnikov N.I., Evdokimova O.G., Kurbanov J.F. Method for detecting the source of radio interference affecting train radio communication in the band of 2.13 and 2.15 MHz // *BRICS Transport*. 2023, Vol. 2, no 2. DOI 10.46684/2023.2.4.

19. Tikhvinskii V., Portnoi S. Seti mobil'noi zheleznodorozhnoi svyazi FRMCS: perspektivy sozdaniya i vnedreniya [FRMCS mobile railway communication networks: prospects for creation and implementation]. *Pervaya milya* [The first mile], 2021, no 3 (95), pp. 54–65.

### Информация об авторах

**Куценко Сергей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, декан факультета безотрывных форм обучения, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: kutsenko@pgups.ru.

**Чинаров Даниил Сергеевич**, инженер внедрения и сопровождения группы внедрения и сопровождения, ООО «НПФ Беркут», г. Санкт-Петербург; e-mail: matsjov@bk.ru.

### Information about the authors

**Sergei M. Kutsenko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Dean of the Faculty of Continuous Forms of Education, Petersburg State Transport University, named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: kutsenko@pgups.ru.

**Daniil S. Chinarov**, Implementation and Support Engineer of the Group of Implementation and Support, Bercut LLC, Saint Petersburg; e-mail: matsjov@bk.ru.



## Разработка мероприятий по поддержанию необходимого уровня напряжения в контактной сети грузонапряженного участка Восточного полигона

Ю.Н. Макаренко, Е.Ю. Пузина✉

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

✉lena-rus05@mail.ru

### Резюме

Одним из основных параметров режима работы системы тягового электроснабжения, уровень которого должен находиться в определенных пределах для обеспечения требуемой пропускной способности данной системы, является напряжение в контактной сети. Реальное значение этого параметра может отклоняться от требований нормативных документов в том случае, если на участке, особенно имеющем сложный профиль пути, изменяются условия организации перевозок: растет их объем, увеличиваются массы составов, уменьшаются межпоездные интервалы. Такая проблема в настоящее время характерна для многих дистанций электроснабжения Восточного полигона в связи с его модернизацией. С целью ее решения в программу развития Восточного полигона закладывается внедрение комплекса средств усиления системы тягового электроснабжения. Однако, несмотря на поэтапную реализацию этой программы, в силу наличия особенностей в системе внешнего электроснабжения (как в ее составе, так и в режимах работы, особенно ремонтных) необходимо более детальное изучение пропускной способности, особенно грузонапряженных участков полигона. В представленной работе приведены результаты исследования текущей пропускной способности участка ТШ–ТЛ на базе моделирования системы электроснабжения в программном комплексе Fazonord. Модели разработаны с учетом предложенных средств усиления. Анализ результатов подтвердил необходимость применения оптимального комбинированного способа усиления системы тягового электроснабжения, включающего такие средства усиления, как устройства продольной компенсации и компенсации реактивной мощности с плавным регулированием, установка дополнительного силового трансформатора на тяговых подстанциях.

### Ключевые слова

системы тягового и внешнего электроснабжения, допустимое напряжение в контактной сети, устройство продольной компенсации, средства усиления систем электроснабжения, параллельная работа силовых трансформаторов

### Для цитирования

Макаренко Ю.Н. Разработка мероприятий по поддержанию необходимого уровня напряжения в контактной сети грузонапряженного участка Восточного полигона / Ю.Н. Макаренко, Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 40–52. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).40-52.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 11.09.2025 г.; поступила после рецензирования: 18.09.2025 г.; принята к публикации: 19.09.2025 г.

## Development of measures to maintain the required voltage level in the contact network of the freight-intensive section of the Eastern polygon

Yu.N. Makarenko, E.Yu. Puzina✉

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

✉lena-rus05@mail.ru

### Abstract

One of the main parameters of the operating mode of the traction power supply system, the level of which must be within certain limits in order to ensure the required throughput of this system, is the voltage in the contact network. The actual value of this parameter may deviate from the requirements of regulatory documents if on a section, especially one with a complex track profile, the conditions for organizing transportation change: their volume and mass of trains increase, and the intervals between trains decrease. This problem is currently characteristic of many power supply distances of the Eastern Polygon in connection with its development. To solve it, the implementation of a set of means for strengthening the traction power supply system is included in the development program of the Eastern Polygon. However, despite the step-by-step implementation of this program, due to the presence of features in the external power supply system, both in its composition and in operating modes, especially repair ones, a more detailed study of the throughput, particularly of freight-intensive sections of this testing ground is necessary. This work presents the results of a study of the current throughput of the TS-TL section based on modeling the power supply system of this section in the Fazonord PVK. The models are developed taking into account the proposed amplification means, an

analysis of the results obtained during the modeling is performed. The results of the analysis confirmed the need to use an optimal combined method of strengthening the traction power supply system, including such means of strengthening as devices for longitudinal compensation and reactive power compensation with smooth regulation, and the installation of an additional power transformer at traction substations.

### Keywords

traction and external power supply systems, permissible voltage in the contact network, longitudinal compensation device, means of amplifying power supply systems, parallel operation of power transformers

### For citation

Makarenko Yu.N., Puzina E.Yu. Razrabotka meropriyatiy po podderzhaniyu neobhodimogo urovnya napryazheniya v kontaktnoi seti gruzonapryazhennogo uchastka Vostochnogo poligona [Development of measures to maintain the required voltage level in the contact network of the freight-intensive section of the Eastern polygon]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. № 3(87). Pp. 40–52. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).40-52.

### Article Info

Received: September 11, 2025; Revised: September 18, 2025; Accepted: September 19, 2025.

### Введение

ОАО «РЖД» является фундаментом российской экономики, обеспечивая до 45 % общего грузооборота страны. Важнейшую роль в обеспечении движения поездов играет система электроснабжения (СЭС), которая должна обеспечивать бесперебойное питание электроподвижного состава для поддержания надлежащего объема перевозок согласно планам развития экономики страны в целом и железнодорожного транспорта в частности. В связи с этим объекты железнодорожной энергетики должны постоянно совершенствоваться и при необходимости модернизироваться для поддержания минимальных межпоездных интервалов движения.

В настоящее время значительное внимание уделяется развитию Восточного полигона ОАО «РЖД», где размеры движения по главному ходу близки к предельным по нагрузке на основные узлы системы тягового электроснабжения (СТЭ) [1–3]. При этом необходимо учитывать и существенный износ тех устройств СТЭ, которые находятся в эксплуатации не один десяток лет [4–7]. Также повышенные нагрузки данной части СЭС оказывают значительное влияние на работу устройств системы внешнего электроснабжения (СВЭ), особенно в период выполнения в ней ремонтных работ [8–10].

Следует учитывать и тот факт, что при постоянном росте объема грузоперевозок требуется сокращение межпоездных интервалов, что многократно усиливает обозначенную проблему. Особенно остро данная ситуация проявляется на участках, для которых характерны крутые или протяженные подъемы в профиле пути.

Все перечисленные обстоятельства вызывают необходимость дальнейшего усиления СТЭ и СВЭ.

Проблеме усиления СЭС посвящены исследования многих российских ученых [11–18]. Предлагается внедрение отдельных средств, повышающих пропускную способность конкретных участков в зависимости от предполагаемого роста объема грузоперевозок [19–20], сочетание нескольких средств на сложных по профилю отрезках железных дорог [1–3, 8–9] и даже целые комплексы мероприятий по усилению как системы тягового, так и внешнего электроснабжения в тех случаях, когда силами только одной системы не удастся реализовать поставленную задачу, а также за счет других систем железнодорожного транспорта [21–24].

Целью данной работы является разработка технических мероприятий, обеспечивающих оптимальное сочетание средств усиления как с технической, так и с экономической точки зрения, с учетом всех особенностей грузонапряженного участка Восточного полигона ТШ–ТЛ.

### Постановка задачи исследования

СВЭ исследуемого участка представляет собой двухцепную воздушную линию напряжением 110 кВ. Питание ВЛ-110 кВ осуществляется от двух районных подстанций (РП): ТШ – 500 кВ и ТЛ – 220 кВ.

ВЛ-110 кВ имеет различное сечение на своем протяжении: на участке ТШ–ЗМ выполнена проводами марки АС-300, на ЗМ–ШБ – проводами марки АС-185, на ШБ–ТЛ – АС-300.

Автотрансформаторы РП имеют мощность от 125 до 250 МВА.

Исследуемый участок железной дороги электрифицирован по системе тяги переменного тока напряжением  $1 \times 25$  кВ. Электроснабжение участка обеспечивается за счет семи тяговых подстанций (ТП), оснащенных силовыми трансформаторами (СТ) мощностью 40 МВА. Его протяженность составляет 280 км. На участке расположены посты секционирования (ПС) и пункты параллельного соединения (ППС). Также на ряде ТП уже используются в качестве средств усиления устройства продольной компенсации (УПК) мощностью 12,8–14,4 МВАр и поперечной компенсации (КУ) мощностью 3–10 МВАр.

На всем протяжении расчетного участка на контактной сети (КС) используется подвеска типа ПБСМ-95 + МФ100, за исключением трех участков: ХГ–ХД – М-120 + МФ-100 с усиливающим проводом А-185 по второму пути; ЗМ–КМ – М-120 + МФ-100; КМ–УК – М-120 + МФ-100 с усиливающим проводом М-120.

Исследуемый участок ТШ–ТЛ характеризуется сложным горно-перевальным профилем пути. На нем присутствуют затяжные подъемы: участок ЗМ–УК (максимальный уклон 8,2‰ длиной 17 км), участок НЖ–ХД (максимальный уклон 9,1‰ длиной 3 км) и участок ХД–БД (максимальный уклон 9,5‰ длиной 2 км).

В 2020–2024 гг. в СТЭ и СВЭ уже реализованы следующие мероприятия по усилению:

- на РП ТШ смонтирован третий резервный автотрансформатор (АТ) мощностью 250 МВА;
- на ПС ХГ установлено устройство компенсации реактивной мощности с плавным регулированием (УКРМп) мощностью 10 МВАр;
- ведутся работы по строительству третьей цепи ВЛ-110 кВ на участке ТШ–ЗМ;
- на ТП УК смонтирован третий тяговый трансформатор.

Несмотря на выполненные работы, остаются некоторые проблемы.

При выводе в ремонт одной из двухцепной ВЛ-110 кВ нагрузка, оказываемая на вторую цепь, является недопустимой. Кроме того, оказывается колоссальная нагрузка на оставшиеся в работе АТ на РП ТШ и ТЛ. Для предотвращения выхода из строя АТ, уменьшения нагрузки на вторую цепь ВЛ, районное диспетчерское управление практикует такой способ, как разрыв транзита СВЭ.

Согласно протоколу совместного совещания филиала АО «СО ЕЭС» Иркутское районное диспетчерское управление (РДУ), ВСИБ НТЭ и ОАО «ИЭСК» на тему «Особенности управления электроэнергетическим режимом на транзите 110 кВ ТШ–ТЛ» от 2022 г. зафиксированы случаи фактического превышения длительно допустимой токовой нагрузки (ДДТН) ВЛ-110 кВ ЗМ–ТШ с отпайками, обусловленные недостаточной пропускной способностью электросетевого оборудования и несимметричной тяговой нагрузкой, для ликвидации которых требуется деление транзита 110 кВ ТШ–ТЛ.

При разрыве транзита ВЛ-110 кВ ЗМ–НЖ по обеим цепям для организации движения поездов необходимо увеличивать предельно допустимые межпоездные интервалы: 12 мин для поездов от 4 200 до 6 300 т, 15 мин для поездов от 6 300 до 7 500 т и 30 мин для соединенных поездов весом от 7 500 т на участке ЗМ–ХД.

Таким образом, при организации движения пакетным графиком и разрыве транзита по обеим цепям ВЛ-110 кВ ЗМ–НЖ расчетная допустимая пропускная способность данного участка составит 72 пары поездов в сутки, что на 20 % меньше, чем планируемые размеры движения нормативного графика 2025 г. при нормальной схеме внешнего электроснабжения.

По предварительной оценке ОАО «ИЭСК», при осуществлении реконструкции существующих ВЛ-110 кВ ЗМ–НЖ разрыв транзита по обеим цепям составит 95 суток, что приведет к снижению пропускной способности данного участка на 9,79 млн т.

Для исключения деления транзита 110 кВ ТШ–ТЛ и обеспечения при этом необходимой пропускной способности в рамках данного исследования необходимо решение следующих задач для участка Восточного полигона ТШ–ТЛ:

- анализ существующей пропускной способности СЭС;
- выявление проблемных зон, ограничивающих пропускную способность;
- разработка предложений по усилению СЭС;
- выбор оптимальных вариантов усиления СТЭ, обеспечивающих необходимую пропускную способность.

### Анализ пропускной способности системы тягового электроснабжения ТШ–ТЛ

В соответствии с проектом тяговых и электрических расчетов для определения перспективных электрических нагрузок и разработки мероприятий III этапа развития Восточного полигона в части объектов электрификации и электроснабжения для участка ТШ–ТЛ при моделировании организован пакетный график движения: в четном направлении – 2 поезда массой 7 388 т через 8 мин и 4 поезда массой 6 588 т также через 8 мин; в нечетном – 48 поездов массой 3 287 т через 11 мин.

На рис. 1 представлен пакетный график движения поездов на исследуемом участке с учетом существующей системы внешнего и тягового электроснабжения.

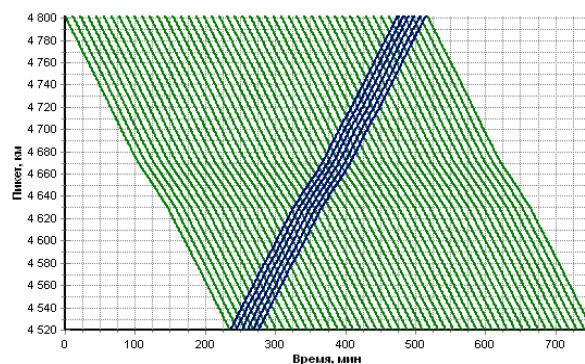


Рис. 1. Расчетный график движения поездов на участке ТШ–ТЛ

Fig. 1. Estimated train schedule on the section ТШ–ТЛ

Для анализа параметров режимов работы СТЭ для участков ТШ–КР и ТШ–ТЛ созданы модели их СЭС в программном комплексе Fazonord (рис. 2, 3).

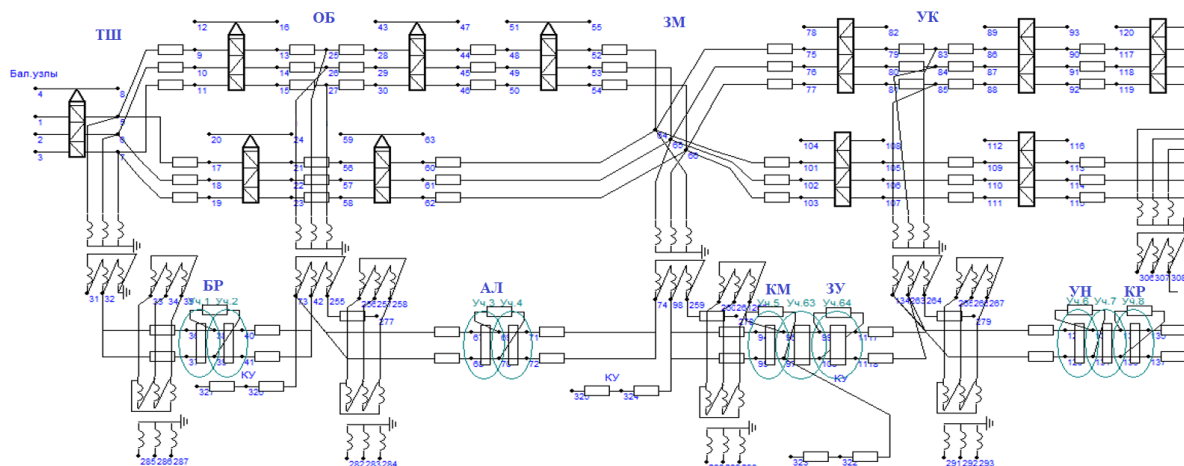


Рис. 2. Модели систем внешнего и тягового электроснабжения на участке ТШ–КР

Fig. 2. Models of external and traction power supply systems on the section ТШ–КР

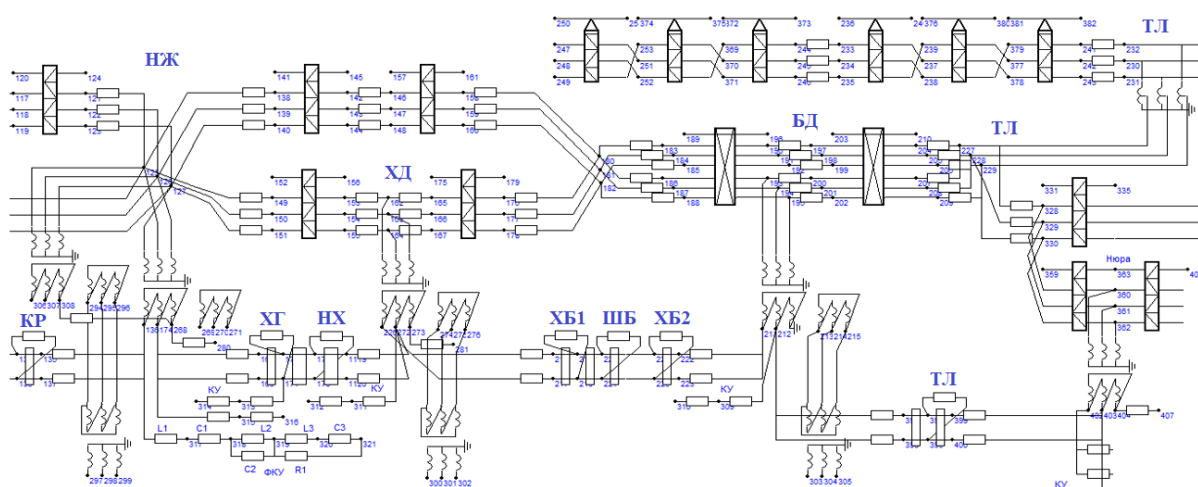


Рис. 3. Модели систем внешнего и тягового электроснабжения на участке КР–ТЛ

Fig. 3. Models of external and traction power supply systems on the site КР–ТЛ

Результаты моделирования свидетельствуют о несоответствии параметров СЭС заданной пропускной способности СТЭ, так как напряжение в КС снижается до 16,5 кВ, поэтому существующая СТЭ на сегодняшний день не способна обеспечить надежное электроснабжение участка ТШ–ТЛ при организации движения поездов с заданными интервалами.

В ходе дальнейшего моделирования выявлено, что существующая СТЭ способна обеспечивать движение поездов по заданному графику при соответствии уровня напряжения в КС нормативному значению только при величине межпоездного интервала 35 мин.

Согласно полученным результатам, делаем вывод, что для поддержания надлежащего уровня напряжения в КС для пропуска потока поездов с интервалами не более 8 мин существующая СТЭ нуждается в усилении. Данная СТЭ способна пропускать пакет поездов с интервалами, превышающими заданные в 4,3 раза.

По результатам моделирования выделены проблемные зоны на участке ТШ–ТЛ (табл. 1).

**Таблица 1.** Лимитирующие зоны на участке ТШ–ТЛ

**Table 1.** Limiting zones on the ТШ–ТЛ section

Направление Direction	Лимитирующий участок Limiting plot	Минимальное напряжение в контактной сети $U_{\min}$ , кВ Minimum voltage in the contact network $U_{\min}$ , kV
Четное Even	ХД–БД	19,351
Нечетное Even		19,705

Стоит отметить, что при уменьшении межпоездных интервалов количество проблемных зон будет увеличиваться.

### Разработка мероприятий по поддержанию необходимого уровня напряжения в контактной сети

Существует несколько способов усиления СТЭ. Рассмотрим каждый отдельно для выбора оптимального.

*Установка устройства компенсации реактивной мощности с плавным регулированием.* С целью плавного изменения уровня

напряжения в КС особенно эффективно применять УКРМП-27,5 кВ.

Выполним моделирование такого устройства в СЭС исследуемого участка – мощностью 10 МВАр на постах секционирования БР и КР. На посту секционирования КМ произведем замену КУ мощностью 3 МВАр на УКРМП-27,5 кВ мощностью 20 МВАр. На посту секционирования ХГ согласно проектным расчетам «Росжелдор Проект» на 2028 г. смоделируем увеличение мощности УКРМП-27,5 кВ с 10 до 15 МВАр. На ПС ХБ2 смоделируем установку УКРМП-27,5 кВ мощностью 15 МВАр.

Пример установки УКРМП-27,5 кВ 15 МВАр на ПС ХГ в разработанной модели представлен на рис. 4.

На рис. 5 показан график изменения напряжения в КС для четного поезда массой 7 100 т при установке УКРМП-27,5 кВ.

Результаты моделирования показали, что применение только данного средства усиления СТЭ не обеспечивает пропуск сформированного пакета поездов без недопустимой просадки напряжения, так как минимальное значение напряжения в КС ( $U_{\min}$ ) ниже минимально допустимого уровня.

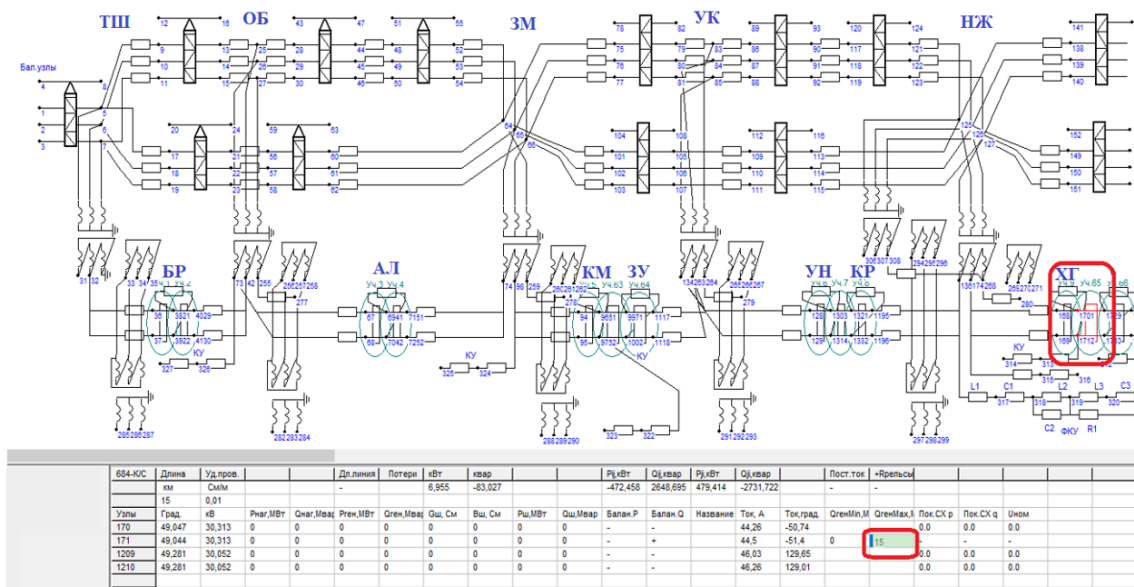
Выделим проблемные зоны на участке ТШ–ТЛ, требующие дополнительного усиления, и сведем полученную информацию в табл. 2. Как видно из приведенных результатов, серьезного усиления требует участок НЖ–ХД.

**Таблица 2.** Лимитирующие зоны на участке ТШ–ТЛ с учетом установки УКРМП-27,5

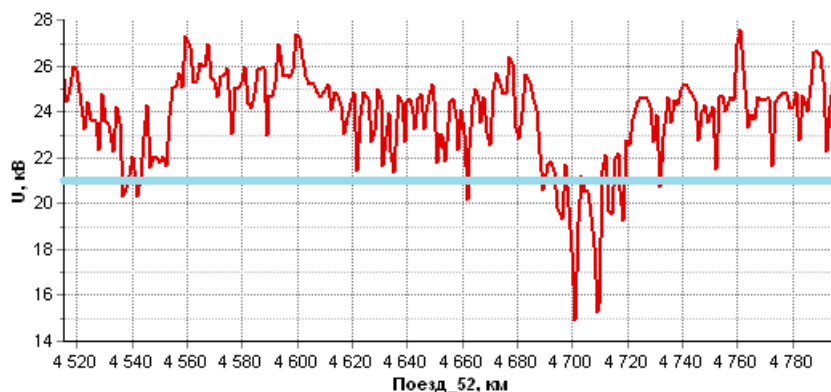
**Table 2.** Limiting zones on the ТШ–ТЛ section taking into account the installation of RPCDs-27,5

№	Проблемный участок Problematic section	Четный поезд Even train	Нечетный поезд Odd train
		$U_{\min}$ , кВ	$U_{\min}$ , кВ
1	ТШ–ОБ	20,270	–
2	УК–НЖ	20,148	19,679
3	НЖ–ХД	14,869	15,242
4	БД–ТЛ	–	20,850

*Повышение мощности используемых устройств продольной компенсации.* Применение УПК основной своей целью имеет повышение напряжения в КС. Если установленные ранее данные устройства не обеспечивают необходимого в этом отношении эффекта, то изменить ситуацию может увеличение их мощности.



**Рис. 4.** Пример установки УКРМП-27,5 кВ мощностью 15 МВАр на посту секционирования ХТ  
**Fig. 4.** An example of installation of a 27.5 kV PPCDs with a capacity of 15 MVar at a sectioning post of ХТ  
 PPCDs-parallel power compensation device with smooth regulation



**Рис. 5.** Диаграмма напряжения в контактной сети во время движения четного поезда  
 при использовании УКРМП-27,5 кВ  
**Fig. 5.** Voltage diagram in the contact network during the movement of an even-numbered train  
 using the RPCDs-27,5 kV

Смоделируем ситуацию повышения мощности УПК ( $Q_{\text{УПК}}$ ) путем добавления дополнительных секций конденсаторных батарей.

В табл. 3 представлены существующие и перспективные мощности УПК. Изменение напряжения в КС показано на графике (рис. 6).

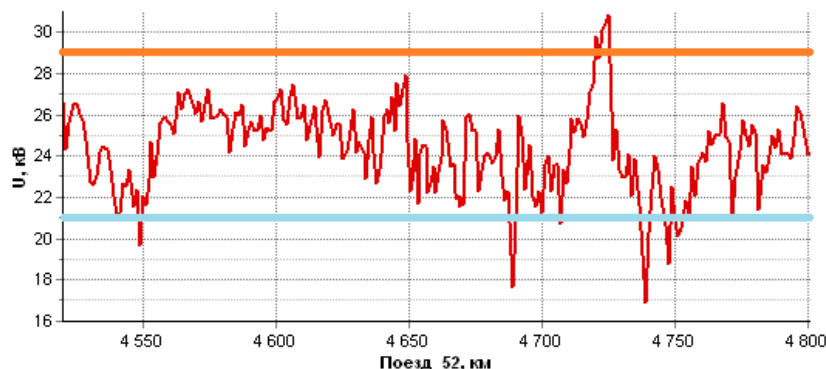
Использование отдельно УПК с увеличенной мощностью привело к снижению напряжения в КС на отдельных зонах и одновременно к перекомпенсации реактивной мощности в момент слабой загрузки участка, когда расчетный пакет поездов еще не окончательно начал свое движение, поскольку напряжение в это время превышает максимально допустимое – 29 кВ.

Стоит также отметить, что по результатам моделирования выявлено и негативное влияние УПК на загрузку СТ ТП. Отмечается перегрузка СТ на всех ТП, а на ТП ХД две из трех фаз СТ перегружены в 2 раза, что является недопустимым для надежной работы.

Установка дополнительного силового трансформатора на тяговой подстанции. Данный способ усиления позволяет включить в параллельную работу СТ, существенно увеличивая выдаваемую в КС мощность и повышая напряжение на токоприемнике электроподвижного состава.

**Таблица 3.** Значения мощностей устройств продольной компенсации  
**Table 3.** Power values of series compensation devices

№	Наименование тяговой подстанции Name of traction substation	$Q_{\text{УПКсущ.}}, \text{ МВАр}$	$Q_{\text{УПКперсп.}}, \text{ МВАр}$
1	ОБ	12,2	14,4
2	ЗМ	12,2	14,4
3	УК	14,4	14,4
4	НЖ	14,4	19,2
5	ХД	14,4	19,2



**Рис. 6.** Диаграмма напряжения в контактной сети при движении четного поезда после увеличения мощности устройства продольной компенсации

**Fig. 6.** Voltage diagram in the contact network during the movement of an even-numbered train after increasing the power of the longitudinal compensation device

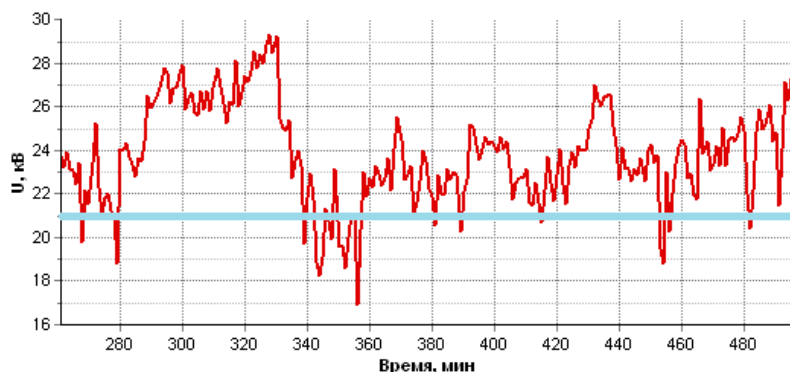
Так как существующая СТЭ не обеспечивает надежного электроснабжения участка ТШ–ТЛ и на всех межподстанционных зонах фиксируются низкие значения напряжения, смоделируем ситуацию, при которой в параллельной работе находятся СТ на следующих ТП: ОБ, ЗМ, ХД.

Параллельная работа СТ на ТП УК и НД учитывается как существующая СТЭ. По требованию РДУ параллельная работа СТ на ТП Д

возможна при условии наличия дифференциально-фазной защиты, предотвращающей отключения линии в связи с короткими замыканиями на КС.

Диаграмма напряжения в КС в случае установки дополнительных СТ на ряде ТП приведена на рис. 7. Лимитирующие зоны на участке ТШ–ТЛ представлены в табл. 4.

По сравнению с ранее рассмотренными вариантами усиления существенно усилился



**Рис. 7.** Диаграмма напряжения в контактной сети

при движении четного поезда при параллельной работе силового трансформатора

**Fig. 7.** Voltage diagram in the contact network

when an even-numbered train is moving with the power transformer operating in parallel



**Таблица 4.** Лимитирующие зоны на участке при параллельной работе силового трансформатора  
**Table 4.** Limiting zones on the site during parallel operation of the power transformer

№	Проблемный участок Problematic section	Четный поезд Even train	Нечетный поезд Odd train
		$U_{\min}$ , кВ	$U_{\min}$ , кВ
1	ТШ–ОБ	18,781	–
2	ЗМ–УК	17,070	17,155
3	УК–НД	20,049	20,144
4	НД–ХД	20,535	–
5	ХД–БД	18,831	18,955
6	БД–ТЛ	20,387	20,190

участок НД–ХД, но возникли проблемы на других зонах – ЗМ–УК, ХД–БД, БД–ТЛ.

Рассмотренные варианты усиления положительно повлияли на уровень напряжения в КС. Так, при одиночном усилении СТЭ путем установки УКРМп-27,5 кВ на участках ЗМ–УК и ХД–БД уровень напряжения в КС не опускается ниже минимально допустимого – 21 кВ. В свою очередь, на участке НД–ХД после повышения мощности УКРМп на ПС ХГ уровень напряжения остается ниже минимально допустимого значения, однако повышается с 14 до 16 кВ.

После повышения мощности УПК напряжение в КС значительно повышается, что говорит об эффективности его использования в рамках стабилизации напряжения в КС. Также УПК значительно влияет на загрузку СТ, что может привести к перегрузке силового оборудования. Для более значительного эффекта необходимо использовать УПК совместно с другими средствами усиления.

Так как отдельные способы усиления не

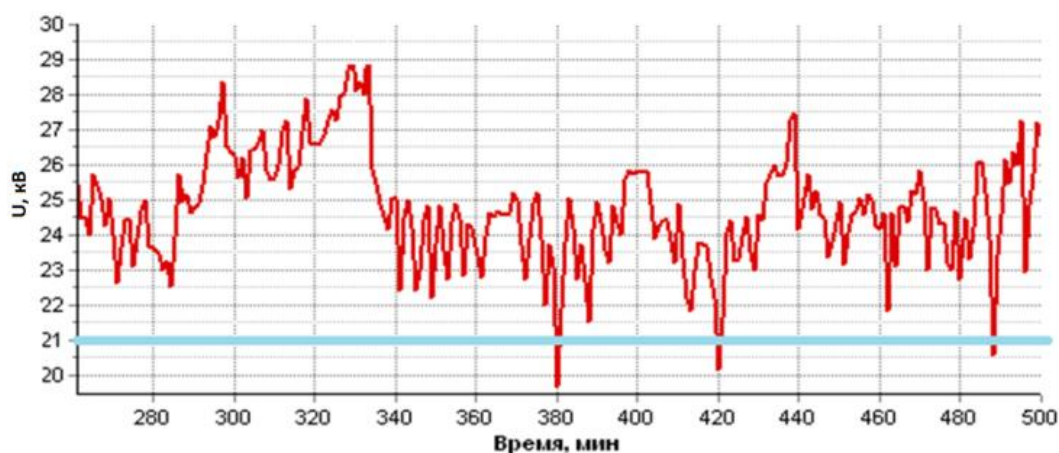
произвели достаточного усиливающего эффекта, необходимо рассмотреть различные варианты их комбинирования.

*Вариант № 1. Совместная работа устройства компенсации реактивной мощности с плавным регулированием и СТ, включенных в параллель.* Смоделируем установку УКРМп-27,5 кВ мощностью 15 МВАр на ТП ХД, ПС ХГ и ПС 4 754 км, 10 МВАр на ПС БР и КР, 20 МВАр на ПС КМ. Также включим в параллельную работу СТ на ТП ОБ, ЗМ и ХД.

График изменения напряжения в контактной сети представлен на рис. 8.

*Вариант № 2. Совместная работа устройства компенсации реактивной мощности с плавным регулированием, СТ, включенных в параллель, и УПК с увеличением мощности до 19,2 МВАр.*

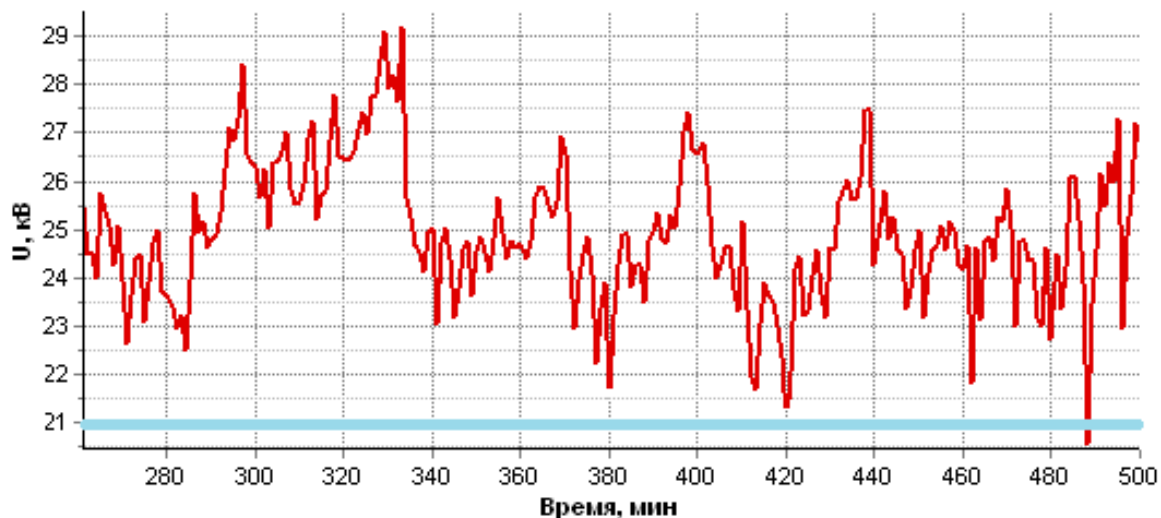
Смоделируем увеличение мощности УПК на ТП УК и НД при совместной работе с вариантом № 1. Результаты моделирования представлены на рис. 9.



**Рис. 8.** Диаграмма напряжения в контактной сети при движении четного поезда при варианте № 1 комбинированного способа усиления

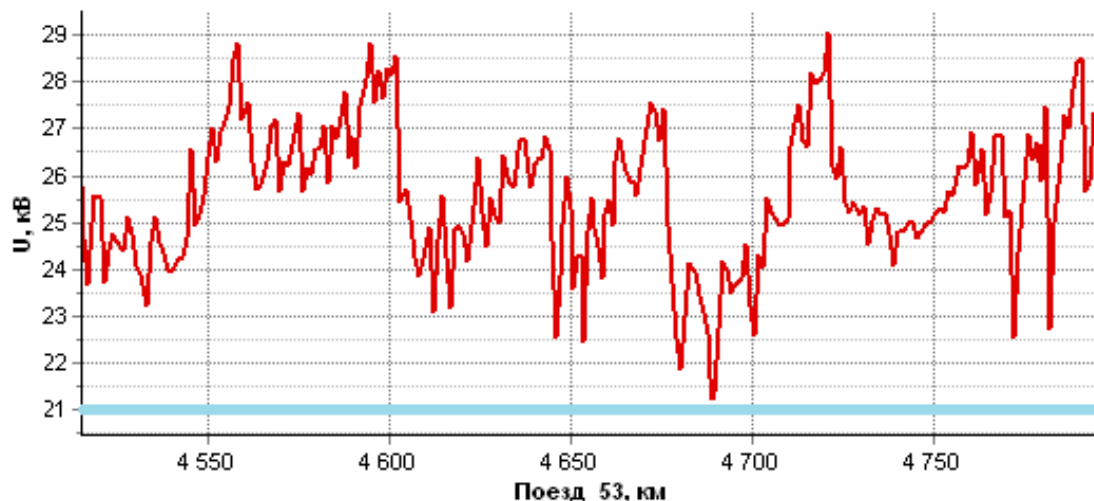
**Fig. 8.** Voltage diagram in the contact network when an even-numbered train is moving for option No 1 of the combined amplification method





**Рис. 9.** Диаграмма напряжения в контактной сети при движении четного поезда при втором варианте комбинированного способа усиления

**Fig. 9.** Voltage diagram in the contact network



**Рис. 10.** Диаграмма напряжения в контактной сети при движении четного поезда при варианте № 3 комбинированного способа усиления

**Fig. 10.** Voltage diagram in the contact network when an even-numbered train is moving for option No 3 of the combined amplification method

*Вариант № 3. Установка устройства компенсации реактивной мощности с плавным регулированием мощностью 10 МВАр на посту секционирования БР, мощностью 20 МВАр на посту секционирования КМ, мощностью 15 МВАр на посту секционирования ХГ. Включение в параллельную работу СТ на ТП ОБ, ЗМ и ХД. Увеличение мощности УПК до 19,2 МВАр на ТП УК, НЖ и ХД, а также установка УПК мощностью 12,2 МВАр на ТП БД*

Результаты моделирования приведены на рис. 10.

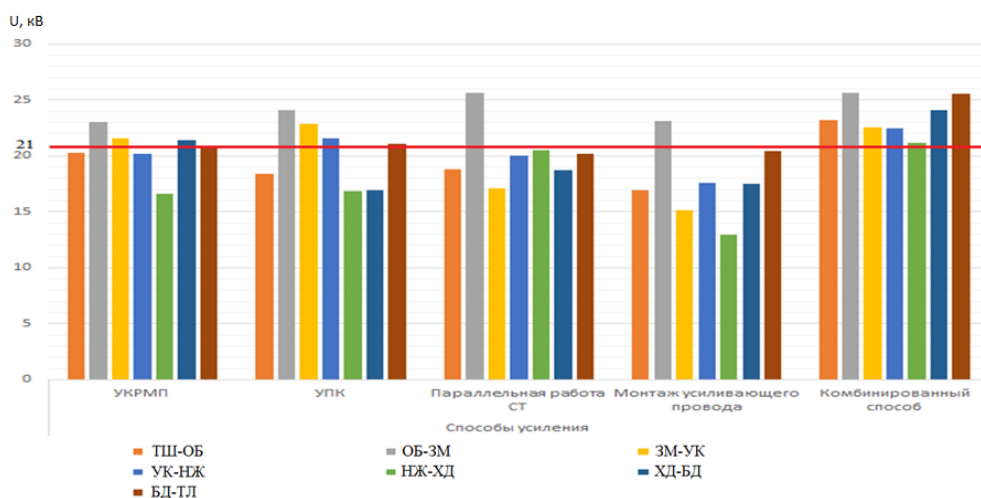
При комбинированном варианте усиления № 3 на протяжении всего исследуемого участка уровень напряжения, подводимого к токоприемнику локомотива, остается выше минимально допустимого значения, что говорит об эффективности предложенных мероприятий по усилению.

Проведем сравнительный анализ всех рассмотренных вариантов усиления и сведем результаты в табл. 5.

Диаграмма изменения напряжения при различных способах усиления СТЭ представлена на рис. 11.

**Таблица 5.** Результаты моделирования усиления участка ТШ–ТЛ по минимальному напряжению в контактной сети  
**Table 5.** Results of modeling the amplification of the TSH–TL section based on minimum voltage in the contact network

Участок Section	Способы усиления Methods of strengthening				
	Устройство компенсации реактивной мощности с плавным регулированием Device compensation reactive power with smooth regulation	Устройство продольной компенсации Series compensation device	Параллельная работа силового трансформатора Parallel work of the power transformer	Монтаж усиливающего провода Installation amplifying wire	Комбинированный способ № 3 Combined Method No 3
	$U_{\min}$ контактной сети, кВ $U_{\min}$ of contact network, kV				
ТШ–ОБ	20,269	18,435	18,781	16,943	23,238
ОБ–ЗМ	23,011	24,109	25,648	23,102	25,656
ЗМ–УК	21,554	22,895	17,070	15,142	22,512
УК–НЖ	20,165	21,574	20,049	17,573	22,508
НЖ–ХД	16,634	16,839	20,535	12,934	21,208
ХД–БД	21,424	16,914	18,756	17,486	24,411
БД–ТЛ	20,726	21,095	20,190	20,432	22,544



**Рис. 11.** Диаграмма изменения напряжения контактной сети при различных вариантах усиления системы тягового электроснабжения

**Fig. 11.** Diagram of voltage changes in the contact network with various options for strengthening the traction power supply system

По результатам комбинирования способов усиления самым эффективным является вариант № 3, так как именно при нем напряжение в КС превышает минимальное допустимое значение на всем рассматриваемом участке.

### Заключение

В ходе выполнения исследования разработаны мероприятия по поддержанию не-

обходимого уровня напряжения в КС исследуемого участка.

По результатам выполненного моделирования СЭС участка ТШ–ТЛ Восточного полигона можно сделать вывод, что единичное усиление СТЭ с помощью какого-либо отдельного средства усиления не привело к удовлетворительным результатам. При комбинированном усилении СТЭ видно, что только при включе-

нии СТ в параллельную работу на указанных ранее ТП, установке УКРМп номинальной мощностью от 10 до 20 МВАр на ряде ПС, увеличении номинальной мощности УПК до 19,2 МВАр на ряде ТП и установке дополнительного УПК мощностью 12,2 МВАр на обозначенной ТП уровень напряжения в КС не опускается ниже 21 кВ на всем протяжении исследуемого участка.

Предлагаемая комбинация средств усиления потребует существенных дополнитель-

ных затрат, но вместе с тем приведет к обеспечению требуемой пропускной способности СТЭ, повысит надежность как ее функционирования, так и СВЭ, позволит получить дополнительную прибыль ОАО «РЖД» от увеличения объема грузоперевозок. Таким образом, задача сохранения и развития пропускной способности как по отдельному участку, так и в целом по Восточному полигону будет решена.

### Список литературы

1. Крапивин М.И., Пузина Е.Ю. Моделирование системы тягового электроснабжения с целью обоснования мероприятий по снятию ограничений в пропускной способности // Актуальные проблемы электроэнергетики : сб. науч.-техн. ст. Нижний Новгород, 2024. С. 162–167.
2. Бардушко А.Ю., Куций А.П. Повышение пропускной способности электрифицированного участка железной дороги Якурим – Киренга на перспективу // Молодая наука Сибири. 2023. № 4 (22). С. 182–193.
3. Галков А.А., Худонов И.А. Применение технологии «виртуальной сцепки» при усилении системы тягового электроснабжения на участке Зима – Иркутск-Сортировочный // Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии в промышленности и на транспорте : материалы X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Омск, 2023. С. 215–220.
4. Лобанов О.В. Система мониторинга работоспособности металлических опорных конструкций для скоростного и высокоскоростного движения электроподвижного состава // Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2021. С. 245–250.
5. Пузина Е.Ю. Целесообразность применения системы мониторинга силовых трансформаторов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2013. Т. 2. С. 167–171.
6. 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.
7. Никищенков С.А., Козменков О.Н., Сафронова И.А. Оценка экономической эффективности применения автоматизированных систем мониторинга технического состояния масляных трансформаторов на железнодорожном транспорте // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11 № 2. С. 120–136.
8. Увеличение пропускной и провозной способности ВСЖД на участке Лена-Восточная-Новый Уоян в свете развития системы внешнего электроснабжения данного участка БАМ в 2019–2023 гг. / В.В. Чернышев, К.Е. Кузнецов, Д.В. Сальникова и др. // Молодая наука Сибири. 2023. № 3 (21). С. 13–22.
9. 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.
10. Моделирование режимов электроэнергетических систем, питающих тяговый подстанции постоянного и переменного тока / А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов и др. // Энергетик. 2024. № 2. С. 9–13.
11. Зарубин А.Д., Астраханцев Л.А. Анализ систем тягового электроснабжения // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 214–220.
12. Козлов Д.Г., Колпакова О.А., Хляка С.В. Повышение надежности электроснабжения // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2023. С. 100–104.
13. Овечкин И.С. Моделирование режимов двойных замыканий на землю в технологических ЛЭП напряжением 35 кВ // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2024. Т. 2. С. 255–261.
14. Паскарь И.Н., Москалева К.А. Регулирование напряжения в энергосистеме с применением мультиагентного подхода // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 1 (159). С. 36–45.
15. Кубкина О.В., Лысенко В.Г. Энергообеспечение мониторинга параметров системы тягового электроснабжения // Инженерный вестник Дона. 2023. № 11 (107). С. 714–724.
16. Коновалов И.Д., Некрасова В.Н., Волков М.А. К вопросу повышения качества электроснабжения потребителей // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2023. № 10. С. 200–205.
17. Влияние надежности электроснабжения и качества электрической энергии на эффективность функционирования электроэнергетической системы / М.А. Дубицкий, Е.В. Зубова, Р.Г. Любовников и др. // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2020. Т. 1. С. 102–108.
18. Крапивин М.И., Исаков А.Е., Пузина Е.Ю. Целесообразность применения электролитического заземления в грунтах с большим удельным сопротивлением // Молодая наука Сибири. 2023. № 2 (20). С. 98–106.

19. Учет влияния устройств фильтрации и компенсации на показатели качества электрической энергии СТЭ при пропуске поездов повышенной массы / Е.А. Морозов, В.В. Фареных, М.В. Востриков и др. // Молодая наука Сибири. 2022. № 4 (18). С. 94–108.

20. Оценка качества напряжения на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции с устройством продольной емкостной компенсации / С.И. Макашева, П.С. Пинчуков, А.Р. Мамаев и др. // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2020. № 3 (88). С. 11–20.

21. Пулятков А.В., Трофимов Ю.А., Скоробогатов М.Э. Комплексные решения по повышению устойчивости работы устройств автоматической локомотивной сигнализации на участках с электротягой переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015. Т. 1. С. 328–332.

22. Каимов Е.В., Оленцевич В.А., Власова Н.В. Проблемы формирования, развития и реконструкции элементов инфраструктурного комплекса железных дорог // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Чита, 2022. Т. 1. С. 288–296.

23. Оленцевич В.А., Власова Н.В. Вопросы моделирования работы локомотивного комплекса с целью обоснования возможности освоения перспективных грузопотоков на восточном направлении страны // Постсоветский материк. 2025. № 3 (47). С. 70–84.

24. Рыжова Е.Л. Применение интеллектуальных технологий для реализации проекта цифровой тяговой подстанции // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 3. С. 15–31.

## References

1. Krapivin M.I., Puzina E.Yu. Modelirovanie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s tsel'yu obosnovaniya meropriyatiy po snyatiyu ogranichenii v propusknoi sposobnosti [Modeling of the traction power supply system in order to justify measures to remove restrictions on throughput]. *Sbornik nauchno-tekhnicheskikh statei X Vserossiiskoi (XLIII Regional'noi) nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aktual'nyye problemy elektroenergetiki»* [Proceedings of the X All-Russian (XLIII Regional) scientific and technical conference «Actual problems of electric power industry»]. Nizhnii Novgorod, 2024, pp. 162–167.

2. Bardushko A.Yu., Kutsyi A.P. Povyshenie propusknoi sposobnosti elektrifitsirovannogo uchastka zheleznoi dorogi Yakurim – Kirenga na perspektivu [Increasing the capacity of the electrified section of the Yakurim – Kirenga railway for the future]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 4 (22), pp. 182–193.

3. Galkov A.A., Khudonogov I.A. Primenenie tekhnologii «virtual'noi stseпки» pri usilenii sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na uchastke Zima – Irkutsk-Sortirovochnyi [Application of the «virtual coupling» technology when strengthening the traction power supply system on the Zima – Irkutsk-Sortirovochnyi section]. *Materialy X Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii v promyshlennosti i na transporte»* [Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Improving the efficiency of operation of electromechanical energy converters in industry and transport»]. Omsk, 2023, pp. 215–220.

4. Lobanov O.V. Sistema monitoringa rabotosposobnosti metallicheskh opornykh konstrukttsii dlya skorostnogo i vysokoskorostnogo dvizheniya elektropodvizhnogo sostava [System for monitoring the operability of metal support structures for high-speed and high-speed movement of electric rolling stock]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnyi proizvodstvennye tekhnologii i resursoberegayushchaya energetika»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Innovative production technologies and resource-saving energy»]. Omsk, 2021, pp. 245–250.

5. Puzina E.Yu. Tselesoobraznost' primeneniya sistemy monitoringa silovykh transformatorov [Feasibility of using a power transformer monitoring system]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia»]. Irkutsk, 2013, Vol. 2, pp. 167–171.

6. 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.

7. Nikishchenkov S.A., Kozmenkov O.N., Safronova I.A. Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti primeneniya avtomatizirovannykh sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya maslyanykh transformatorov na zheleznodorozhnom transporte [Assessment of the economic efficiency of using automated systems for monitoring the technical condition of oil transformers in railway transport]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2025, Vol. 11, no 2, pp. 120–136.

8. Chernyshev V.V., Kuznetsov K.E., Sal'nikova D.V., Kutsyi A.P. Uvelichenie propusknoi i provoznoi sposobnosti VSZHD na uchastke Lena-Vostochnaya–Novyi Uoyan v svete razvitiya sistemy vneshnego elektrosnabzheniya dannogo uchastka BAM v 2019–2023 godakh [An increase in the capacity and carrying capacity of the Russian Railways on the Lena-Vostochnaya-Novyi Uoyan section in view of the development of the external power supply system for this section of the BAM in 2019–2023]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 3 (21), pp. 13–22.

9. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Traction Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018, pp. 1–5.

10. Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguyen Q.H. Modelirovanie rezhimov elektroenergeticheskikh sistem, pitayushchikh tyagovye podstantsii postoyannogo i peremennogo toka [Modeling of modes of electric power systems supplying traction substations of direct and alternating current]. *Energetik* [Power Engineering], 2024, no 2, pp. 9–13.

11. Zarubin A.D., Astrakhantsev L.A. Analiz sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Analysis of traction power supply systems]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no 2 (12), pp. 214–220.

12. Kozlov D.G., Kolpakova O.A., Khlyaka S.V. Povyshenie nadezhnosti elektrosnabzheniya [Improving the reliability of power supply]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt,*

*problemy i puti ikh resheniya v APK* [Proceedings of the international scientific and practical conference «Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions in agriculture»]. Voronezh, 2023, pp. 100–104.

13. Ovechkin I.S. Modelirovanie rezhimov dvoynykh zamykaniy na zemlyu v tekhnologicheskikh LEP napryazheniem 35 kV [Modeling of double earth fault modes in technological power lines with a voltage of 35 kV]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Improving the efficiency of energy production and use in Siberia»]. Irkutsk, 2024, pp. 255–261.

14. Paskar' I.N., Moskaleva K.A. Regulirovanie napryazheniya v energosisteme s primeneniem mul'tiagentnogo podkhoda [Voltage regulation in the power system using a multi-agent approach]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2022, no 1 (159), pp. 36–45.

15. Kubkina O.V., Lysenko V.G. Energoobespechenie monitoringa parametrov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Energy supply for monitoring parameters of traction power supply system]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2023, no 11 (107), pp. 714–724.

16. Konovalov I.D., Nekrasova V.N., Volkov M.A. K voprosu povysheniya kachestva elektrosnabzheniya potrebiteli [On the issue of improving the quality of power supply to consumers]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region], 2023, no 10, pp. 200–205.

17. Dubitskii M.A., Zubova E.V., Lyubovnikov R.G., Makarova A.V. Vliyanie nadezhnosti elektrosnabzheniya i kachestva elektricheskoi energii na effektivnost' funktsionirovaniya elektroenergeticheskoi sistemy [Influence of reliability of power supply and quality of electric energy on the efficiency of functioning of the electric power system]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation «Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia»]. Irkutsk, 2020, Vol. 1, pp. 102–108.

18. Krapivin M.I., Isakov A.E., Puzina E.Yu. Tselesoobraznost' primeneniya elektroliticheskogo zazemleniya v gruntakh s bol'shim udel'nym soprotivleniem [Feasibility of using electrolytic grounding in soils with high specific resistance]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 2 (20), pp. 98–106.

19. Morozov E.A., Farenyk V.V., Vostrikov M.V., Tikhomirov V.A. Uchet vliyaniya ustroystv fil'tratsii i kompensatsii na pokazateli kachestva elektricheskoi energii STE pri propuske poezdov povyshennoi massy [Consideration of the influence of filtration and compensation devices on the quality of electric energy of the traction power supply system when passing trains of increased mass]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2022, no 4 (18), pp. 94–108.

20. Makasheva S.I., Pinchukov P.S., Mamaev A.R., Terletskii S.G. Otsenka kachestva napryazheniya na shinakh 27,5 kV tyagovoi podstantsii s ustroystvom prodol'noi emkostnoi kompensatsii [Evaluation of the quality of voltage on 27,5 kV tires of a traction substation with a longitudinal capacitive compensation device]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2020, no 3 (88), pp. 11–20.

21. Pul'tyakov A.V., Trofimov Yu.A., Skorobogatov M.E. Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoychivosti raboty ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii na uchastkakh s elektrotiyagoi peremennogo toka [Integrated solutions to improve the stability of automatic locomotive signaling devices in areas with alternating current electric traction]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2015, Vol. 1, pp. 328–332.

22. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Problemy formirovaniya, razvitiya i rekonstruktsii elementov infrastrukturnogo kompleksa zheleznykh dorog [Problems of formation, development and reconstruction of elements of the railway infrastructure complex]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2-kh t.)* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2022, Vol. 1, pp. 288–296.

23. Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Voprosy modelirovaniya raboty lokomotivnogo kompleksa s tsel'yu obosnovaniya vozmozhnosti osvoeniya perspektivnykh gruzopotokov na vostochnom napravlenii strany [Issues of modeling the operation of a locomotive complex in order to substantiate the possibility of developing promising freight flows in the eastern direction of the country]. *Postsovetitskii materik* [Post-Soviet Continent], 2025, no 3 (47), pp. 70–84.

24. Ryzhova E.L. Primenenie intellektual'nykh tekhnologii dlya realizatsii proekta tsifrovoy tyagovoi podstantsii [Application of intelligent technologies for the implementation of the digital traction substation project]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Innovative transport systems and technologies], 2023, Vol. 9, no 3, pp. 15–31.

### Информация об авторах

**Макаренко Юрий Николаевич**, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: makarenkaaa73@gmail.com.

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

### Information about the authors

**Yurii N. Makarenko**, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: makarenkaaa73@gmail.com.

**Elena Yu. Puzina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

## Определение расчетной толщины теплоизоляции из золошлаковых отходов

Д.А. Ковенькин✉, Д.О. Туманов, Ю.А. Ходырев

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

✉kovenkin\_da@irgups.ru

### Резюме

Земляное полотно железнодорожного пути зачастую подвержено деформациям. Это происходит из-за изменения его теплофизических, физико-механических и физико-химических характеристик. Развитие деформаций в связи с осадкой оттаивающих грунтов или их пучения в результате промерзания представляет собой сложный многофакторный процесс. Для борьбы с указанными явлениями в настоящее время применяют теплоизоляционный слой из плит экструдированного пенополистирола. Однако, как показывает опыт эксплуатации данного материала, он имеет ряд недостатков, которые напрямую влияют на стабильность земляного полотна. Одним из возможных заменителей для теплоизоляции земляного полотна можно рассмотреть новый материал, производимый из золошлаковых отходов. Лабораторные исследования подтверждают, что он по теплоемкости и теплопроводности немного уступает экструдированному пенополистиролу, однако его прочность при одноосном сжатии значительно выше. В статье приведены качественные и количественные характеристики обоих материалов, представлены результаты расчетов, проведенных в программном комплексе Frost 3D Universal по определению расчетной толщины теплоизоляционного слоя, изготовленного на основе золошлаковых отходов. С целью установления зависимости толщины нового материала от суммы градусо-суток отрицательных температур за год, расчеты проведены при разных климатических условиях. По их результатам выявлено, что этот образец может использоваться в качестве защитного теплоизоляционного слоя на основной площадке земляного полотна для предотвращения образования пучин. Найдена линия тренда, выраженная функциональной зависимостью, для определения толщины теплоизоляции при разных климатических условиях.

### Ключевые слова

пенополистирол, морозное пучение, теплоизоляция, золошлаковые отходы, тепловые расчеты, толщина теплоизоляции

### Для цитирования

Ковенькин Д.А. Определение расчетной толщины теплоизоляции из золошлаковых отходов / Д.А. Ковенькин, Д.О. Туманов, Ю.А. Ходырев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 53–63. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).53-63.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 04.09.2025 г.; поступила после рецензирования: 11.09.2025 г.; принята к публикации: 12.09.2025 г.

## Determination of the calculated thickness of thermal insulation made of ash and slag waste

D.A. Koven'kin✉, D.O. Tumanov, Yu.A. Khodyrev

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

✉kovenkin\_da@irgups.ru

### Abstract

The roadbed of a railway track is often subject to deformations, this is due to changes in its thermophysical, physical and mechanical and physicochemical characteristics. The development of deformations due to the settlement of thawing soils and the swelling of freezing soils is a complex multifactorial process. To combat the swelling of freezing soils and the settlement of thawing soils, a heat-insulating layer of extruded polystyrene foam boards is currently used. However, as operating experience shows, this material has a number of disadvantages that directly affect the stability of the roadbed. One of the possible substitute materials for roadbed thermal insulation can be considered a new material based on ash and slag waste. According to the results of laboratory studies, this material has heat capacity and thermal conductivity indicators that are slightly worse than those of extruded polystyrene foam, but the strength under uniaxial compression is significantly higher. The article provides their qualitative and quantitative characteristics. This article presents the results of calculations carried out in the Frost 3D Universal software package to determine the optimal thickness of a heat-insulating layer based on ash and slag waste. In order to establish the dependence of the thickness of the new material on the sum of degree-days of negative temperatures per year, the calculations were carried out under different climatic conditions. Based on the calculation results, it was found that the new material can be used as a protective heat-insulating layer in the body of the embankment of the roadbed to prevent swelling of the soils located below the heat-insulating layer. A trend line was found, expressed by a functional dependence, to determine the thickness of the heat insulation under different climatic conditions.

**Keywords**

expanded polystyrene, frost heaving, thermal insulation, ash and slag waste, thermal calculations, thermal insulation thickness

**For citation**

Koven'kin D.A., Tumanov D.O., Kodyrev Yu.A. Opredelenie rashchetnoi tolshchiny teploizolyatsii iz zoloshlakovykh otkhodov [Determination of the calculated thickness of thermal insulation made of ash and slag waste]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2025. № 3(87). Pp. 53–63. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).53-63.

**Article Info**

Received: September 4, 2025; Revised: September 11, 2025; Accepted: September 12, 2025.

**Введение**

В соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г. одним из важнейших направлений является доведение технического и технологического уровня инфраструктуры, подвижного состава, сферы их содержания и ремонта до лучших мировых стандартов [1].

Современные проблемы требуют актуальных решений и новых экологических материалов. В железнодорожном транспорте все чаще находят применение композиционные материалы [2]. Сочетание их с классическими материалами увеличивает срок службы изделий, повышает их стойкость к перепаду температур и ремонтпригодность, снижает количество вредных выбросов в атмосферу.

По данным ОАО «РЖД», при общей протяженности земляного полотна в 86 240 км дефекты и деформации земляного полотна занимают почти 6 000 км. Это примерно 7 % от его общей эксплуатационной длины. На проблемных участках осадки и пучины (просадки, морозное пучение) составляют более 35 % от всех дефектов. Земляное полотно подвергается постоянным сезонным деформациям, что влияет на состояние геометрии рельсовой колеи. Это, в свою очередь, создает риск нарушения бесперебойного и безопасного движения подвижного состава по сети железных дорог.

Деформации земляного полотна – сложный процесс, возникающий из-за промерзания грунтов и последующего их оттаивания. Эти изменения связаны с преобразованием тепловых, механических и химических свойств грунта [3–7].

В настоящее время для борьбы с этими деформациями широко используется легкий синтетический теплоизолятор – пенополистирол, отличающийся низкой теплопроводностью [8]. Однако данный материал имеет ряд недостатков: низкая прочность на сжатие и изгиб;

постепенное накапливание влаги (это может приводить к потере теплоизоляционных свойств, что достаточно критично на обводненных грунтах); подверженность термоокислительным процессам; разрушение под действием углеводородных растворителей; проблемы с утилизацией (не разлагается) [9].

На рис. 1 показан излом пенополистирольных плит, происходящий, как правило, при проходе путевой техники во время их укладки.

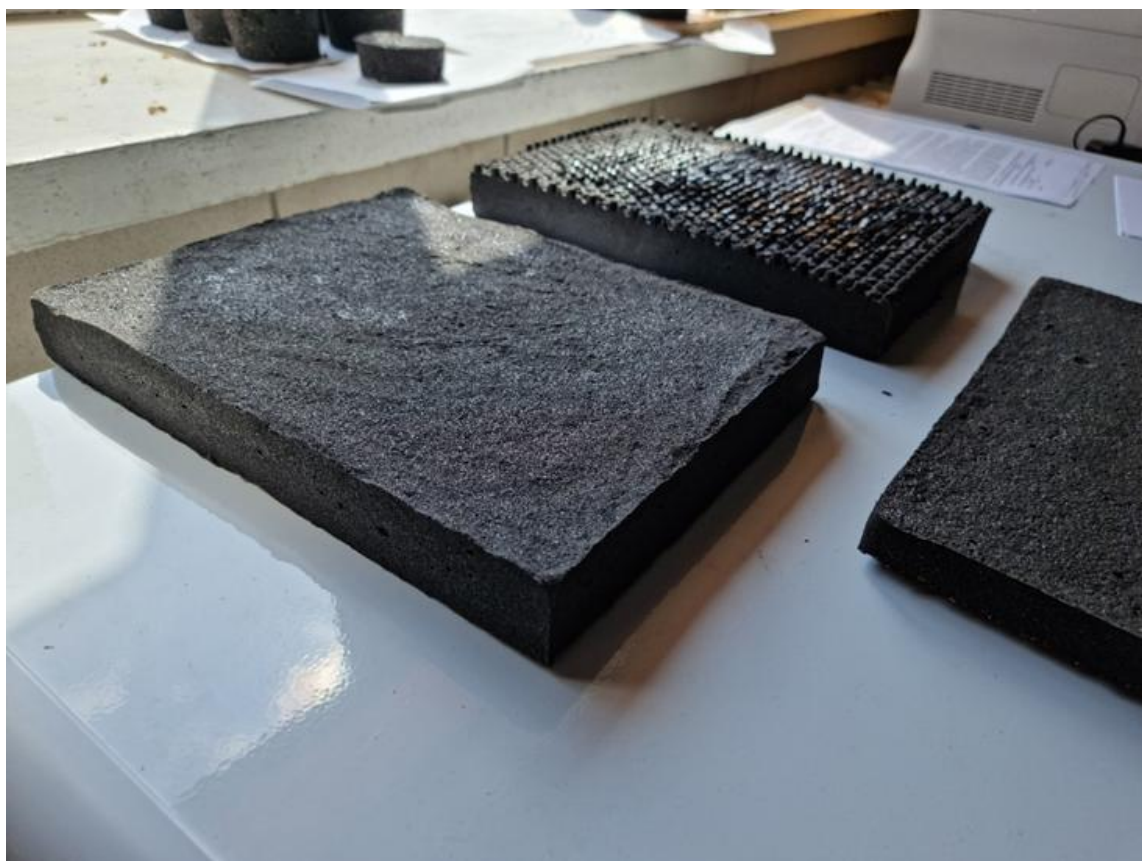


**Рис. 1.** Трещины на плитах из пенополистирола, появляющиеся во время их укладки

**Fig. 1.** Fractures of polystyrene foam slabs during their laying

Для того чтобы ликвидировать или хотя бы уменьшить такие недостатки теплоизоляционного слоя из пенополистирольных плит, предлагается применить новый материал, разработанный на основе золошлаковых отходов (ЗШО). Предполагается, что его использование позволит повысить эффективность защиты земляного полотна от воздействия отрицательных температур. Кроме того, это экологически оправдано в качестве способа ликвидации накопленного ущерба и сохранения природных ресурсов. Образцы предлагаемого материала представлены на рис. 2.





**Рис. 2.** Теплоизоляционный материал на основе золошлаковых отходов

**Fig. 2.** Samples of the obtained ash and waste composite materials

Теплоизоляция с применением материалов на основе ЗШО – это создание теплоизоляционного слоя в теле насыпи земляного полотна для предотвращения промерзания пучинистых грунтов с целью предотвращения сверхнормативного морозного пучения грунтов вследствие воздействия на них отрицательных температур [10–13]. Кроме того, золошлаковая смесь уже рассматривалась в качестве разновидности техногенного грунта, из которого можно сооружать земляное полотно [14].

Новый теплоизоляционный материал получен в результате смешивания в специальных условиях определенной запатентованной полимерной добавки с отходами угольного горения (ЗШО). Материал разработан учеными Забайкальского института железнодорожного транспорта под руководством доктора технических наук Н.А. Коноваловой.

Данный материал при лабораторных исследованиях показал хорошие показатели по теплоемкости –  $0,0796 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ , теплопроводности –  $0,17 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  и прочности при одноосном сжатии –  $3,5 \text{ МПа}$ .

В табл. 1 приведены теплофизические свойства нового композиционного материала в сравнении с пенополистиролом.

На данном этапе исследования определяется наиболее эффективная сфера применения нового материала. Целью статьи является установление зависимости его толщины от суммы градусо-суток отрицательных температур за год.

Научная новизна работы заключается в определении области применения теплоизоляционных плит из ЗШО на основной площадке земляного полотна в зависимости от климатических условий.

### **Материалы и методы исследования**

Для определения расчетной толщины теплоизоляции был применен сертифицированный программный комплекс Frost 3D Universal, разработанный ООО «Симмэйкерс». Лежащие в основе программы Frost 3D Universal алгоритмы и методы (способы обработки и интерпретации информации) запатентованы [15].

Frost 3D Universal – это программный комплекс для трехмерного моделирования теп-



Таблица 1. Физические характеристики материалов

Table 1. Physical Properties of Materials

Наименование параметра материала Material parameter name	Материал Material	
	Пенополистерол Polystyrene foam	Композиционный материал Composite material
Объемная теплоемкость, МДж/(м³·°C) Volumetric heat capacity, MJ/(m³ · °C)	0,0621	0,0796
Теплопроводность, Вт/(м·°C) Thermal conductivity, W/(m · °C)	0,031	0,17
Суммарная весовая влажность, д.е. Weight, d.u.	0	0
Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	45	78,2
Температура фазового перехода, °C Phase transition temperature, °C	0	0
Коэффициент фильтрации, м/сут Filtration coefficient, m/day	$8,64 \cdot 10^{-8}$	$8,64 \cdot 10^{-8}$

ловых процессов, происходящих в грунтах (особенно в многолетнемерзлых породах), позволяющий решать широкий спектр задач, связанных с теплообменом в них:

– моделирование температурных полей, расчет распределения температур в грунтах основания с учетом фазовых переходов «вода – лед»;

– учет фильтрации, моделирование конвективного переноса тепла грунтовыми водами, что критически важно для таких объектов, как дамбы и плотины;

– проектирование на мерзлых грунтах, теплотехнический анализ для обоснования проектных решений зданий, трубопроводов, дорог и других сооружений в криолитозоне;

– работа с тепловой изоляцией (в базе данных материалов присутствуют свойства экструзионного пенополистирола для расчета теплозащиты конструкций);

– создание цифровых двойников, разработка компьютерных моделей, синхронизированных с системами геотехнического мониторинга для прогнозирования аварийных ситуаций.

С целью проведения расчетов в программном комплексе Frost 3D Universal был смоделирован участок земляного полотна. Модель состоит из следующих слоев: основание (суглинки, галечниковый грунт, глина твердая, глина полутвердая); тело насыпи (песок); теплоизоляционный слой; защитный подбалластный слой; балластная призма (щебень). Поперечный профиль земляного полотна представлен на рис. 3.

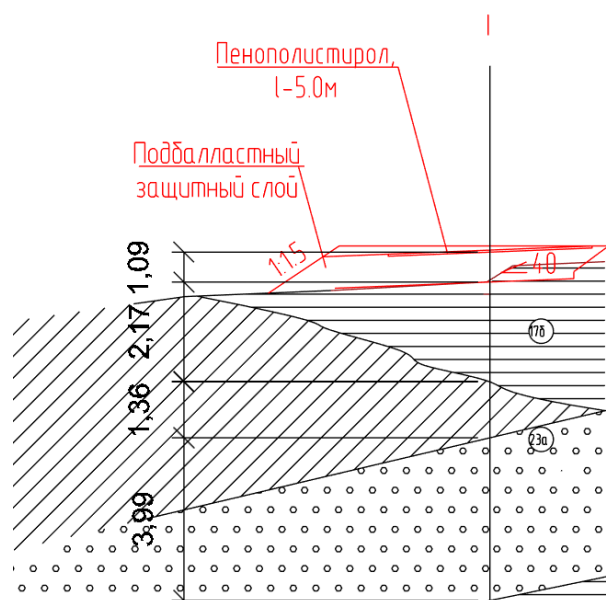


Рис. 3. Детализация распределения грунтов по вертикальной оси

Fig. 3. Detailing of soil distribution along the vertical axis

Физические и теплофизические свойства грунтов основания и тела земляного полотна, а также свойства материала балластной призмы представлены в табл. 2. Экспликация инженерно-геологических элементов приведена в табл. 3.

Проводился расчет распределения температур в грунтах земляного полотна с предлагаемой теплоизоляцией под балластной призмой. Толщина теплоизоляции принималась равной от 0,05 до 0,2 м с шагом 0,05, ее ширина (размер поперек оси земляного полотна) – 5 м.

Таблица 2. Физические и теплофизические свойства грунтов

Table 2. Physical and Thermophysical Properties of Soils

Наименование грунта Soil Name	Теплопроводность, Вт/(м· °K) Thermal Conductivity, W/(m· °K)		Объемная теплоем- кость, МДж/(м³· °K) Volumetric Heat Capac- ity, MJ/(m³· °K)		Суммарная влажность, д.е. Total Moisture Content, frac.	Плотность в сухом состоянии, кг/м³ Dry Density, kg/m³	Температура начала замерзания, °C Initial Freezing Temperature, °C
	талого thawed	мерзлого frozen	талого thawed	мерзлого frozen			
Грунты основания земляного полотна Roadbed foundation soils							
16а Суглинок Loam	1,57	1,80	3,17	2,41	0,13	1 830,00	−0,31
23а Галечниковый грунт Pebble soil	2,00	2,20	2,39	2,08	0,10	1 800,00	−0,32
17а Глина твердая Hard clay	2,00	2,20	2,39	2,08	0,15	1 800,00	−0,32
17б Глина полутвердая Semihard clay	1,57	1,80	3,17	2,41	0,19	1 710,00	−0,31
Грунты тела земляного полотна Roadbed embankment soils							
Песок Sand	1,45	1,51	2,35	2,18	0,05	1 900,00	0,00
Балласт Ballast							
Щебень Crushed stone	2,00	2,35	1,84	1,675	0,10	1 800,00	0,00

Таблица 3. Экспликация грунтов

Table 3. Soil Legend

Наименование грунта Soil Name	Степень морозной пучинистости ( $\varepsilon_{fn}$ ) Degree of Frost Heave Susceptibility	Мощность слоя по вертикальной оси пути, м Layer Thickness Along the Track Vertical Axis
Защитный дренирующий слой – песок Protective drainage layer – sand	Принят $\varepsilon_{fn} = 0,1 \%$ Accepted $\varepsilon_{fn} = 0,1\%$	1,09
17б Глина с галькой полутвердая Semi-hard clay with pebbles	Слабопучинистые ( $\varepsilon_{fn} = 1,5 - 3,0 \%$ ), принят $\varepsilon_{fn} = 2 \%$ Slightly heaving ( $\varepsilon_{fn} = 1,5 - 3,0\%$ ), adopted $\varepsilon_{fn} = 2\%$	2,17
16а Суглинок галечниковый, твердый, с примесью органического вещества Pebble loam, solid, with an admixture organic matter	Непучинистые ( $\varepsilon_{fn} = 0,3 - 0,95 \%$ ) Non-heaving ( $\varepsilon_{fn} = 0,3 - 0,95\%$ )	1,36
23а Галечниковый грунт с суглинистым заполнителем, малой степени водонасыщения Pebble soil with loamy filler, low degree of water saturation	Непучинистые ( $\varepsilon_{fn} = 0,3 - 0,95 \%$ ) Non-heaving ( $\varepsilon_{fn} = 0,3 - 0,95\%$ )	3,99

Толщина защитного слоя на покрытии составила 0,1 м. Толщина защитного дренирующего слоя под покрытием принята 1,09 м.

Исходные данные по средней месячной и годовой температурам воздуха представлены в табл. 4. Здесь показана сумма градусо-суток отрицательных температур, равная – 1 800 °C.

Температурный тренд глобального потепления для этой местности – 0,06 °C в год. Среднезимняя теплопроводность снегового покрова принята равной 0,28 Вт/м °C.

Согласно СП 447.1325800.2019 [16], при отсутствии достаточных данных допускается учет суммарной поправки к среднемесячным

температурам воздуха за счет солнечной радиации и испарения путем прибавления к среднемесячным значениям температуры воздуха с апреля по сентябрь температурной добавки  $\Delta t = 3^\circ\text{C}$ . При проведении расчетов было принято именно такое решение.

На балластной призме высота снега бралась равной 0 м, так как происходит периодическая очистка железнодорожного пути от снега по условиям эксплуатации. Кроме того, снег выдувает ветром, в том числе от проходящих поездов.

Учет дополнительного теплопритока на естественную поверхность грунта за счет воздействия солнечной радиации производился согласно [17] для  $55^\circ$  с.ш. Результаты расчета представлены в табл. 5.

Расчеты производились согласно методике, описанной в СП 498.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории».

## Результаты исследования

Расчет распределения температур в грунтах земляного полотна с предлагаемой теплоизоляцией под балластной призмой проводился с прогнозом эффективности действия сроком на пять лет. Трехмерная модель земляного полотна показана на рис. 4. Результаты теплотехнических расчетов, выполненных в программном комплексе Frost 3D Universal, визуализированы в виде изоповерхностей, показывающих распределение температуры по всему поперечному сечению земляного полотна. На рис. 5 представлено такое распределение.

Теплотехнические сравнительные расчеты с применением программного комплекса Frost 3D Universal позволили определить температуру грунта под теплоизоляцией. Прямое влияние на возможность промерзания земляного полотна под слоем теплоизоляции оказывает сумма градусо-суток отрицательных температур воздуха в течение года.

Для экспериментального материала на основе ЗШО в программном комплексе Frost

Таблица 4. Климатические условия

Table 4. Climatic conditions

Показатель Parameter	Месяц Month											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, $^\circ\text{C}$ Air temp, $^\circ\text{C}$	-16,90	-14,20	-6,20	1,20	8,90	16,00	18,40	15,30	8,30	0,80	-7,70	-15,40
Коэффициент конвективного теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{K})$ Convective heat transfer coefficient, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$	15,80	14,96	14,96	16,22	16,22	14,96	13,70	13,70	14,12	15,80	15,80	16,22
Скорость ветра, м/с Wind speed, m/sec	2,30	2,10	2,10	2,40	2,40	2,10	1,80	1,80	1,90	2,30	2,30	2,40
Высота снежного покрова на откосах, м Snow depth on slopes, m	0,47	0,49	0,51	0,47	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,25	0,38

Таблица 5. Значение суммарной солнечной радиации

Table 5. Total Solar Radiation Value

Параметр Parameter	Месяц Month											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Ф – суммарная солнечная радиация, $\text{Вт}/\text{м}^2$ Ф – total solar radiation, $\text{W}/\text{m}^2$	30	60	135	190	240	240	240	185	125	75	35	20

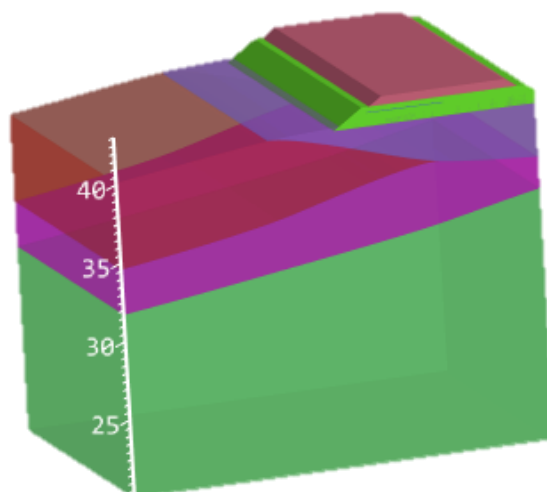


Рис. 4. Трехмерная геометрия земляного полотна  
Fig. 4. Three-Dimensional Subgrade Geometry

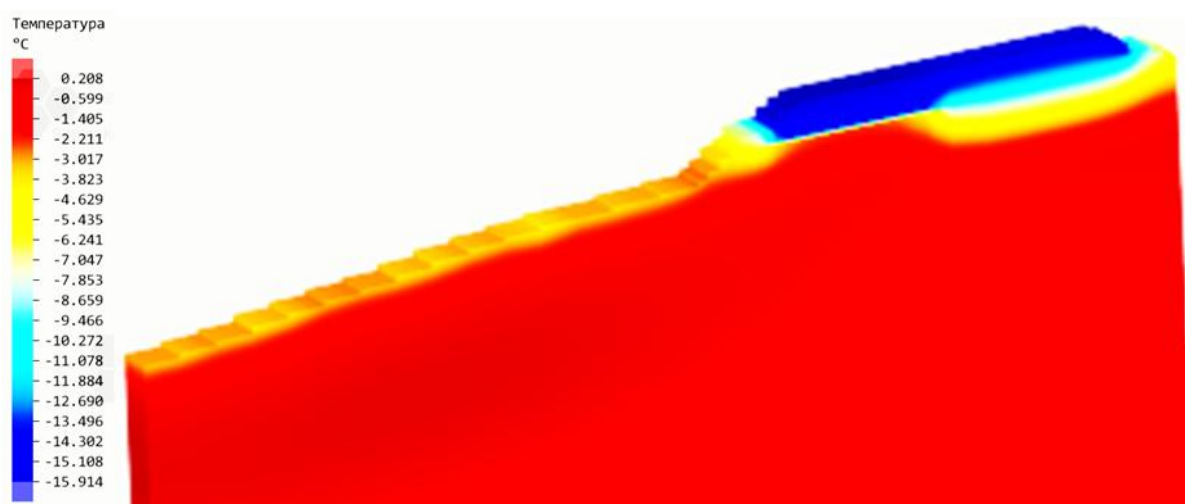


Рис. 5. Трехмерная визуализация температуры  
Fig. 5. Three-Dimensional Temperature Visualization

3D Universal были рассчитаны эксплуатационные возможности из условия не превышения максимальной величины морозного пучения более допустимой. Согласно [18], расчетная допустимая величина равномерного морозного пучения принимается равной для:

- особогрузонапряженной линии – 15 мм;
- линий I и II категории – 20 мм;
- линий III категории – 25 мм;
- линий IV категории – 35 мм.

Расчеты высоты морозного пучения проведены для последнего месяца с отрицательной температурой воздуха в сезоне. Пока действует отрицательная температура, грунт будет промерзать. Такому месяцу соответствует март.

На железных дорогах основным нормируемым параметром, характеризующим мороз-

ное пучение, является высота морозного пучения, которая определяется по следующей зависимости:

$$h_{\text{пуч}} = \sum_{i=1}^n (H_i \cdot \varepsilon_{fni}),$$

где  $h_{\text{пуч}}$  – высота пучения;  $\varepsilon_{fni}$  – коэффициент морозного пучения в  $i$ -ом слое;  $H_i$  – глубина промерзания грунта  $i$ -го слоя.

На основании данных инженерно-геологических изысканий получены величины коэффициента морозного пучения для грунтов, из которых сложено земляное полотно на рассматриваемом участке:

- 0,1 % – для защитного дренирующего слоя – песок;
- 2 % – для глины с галькой полутвердой.

В табл. 6 представлены итоги моделирования.

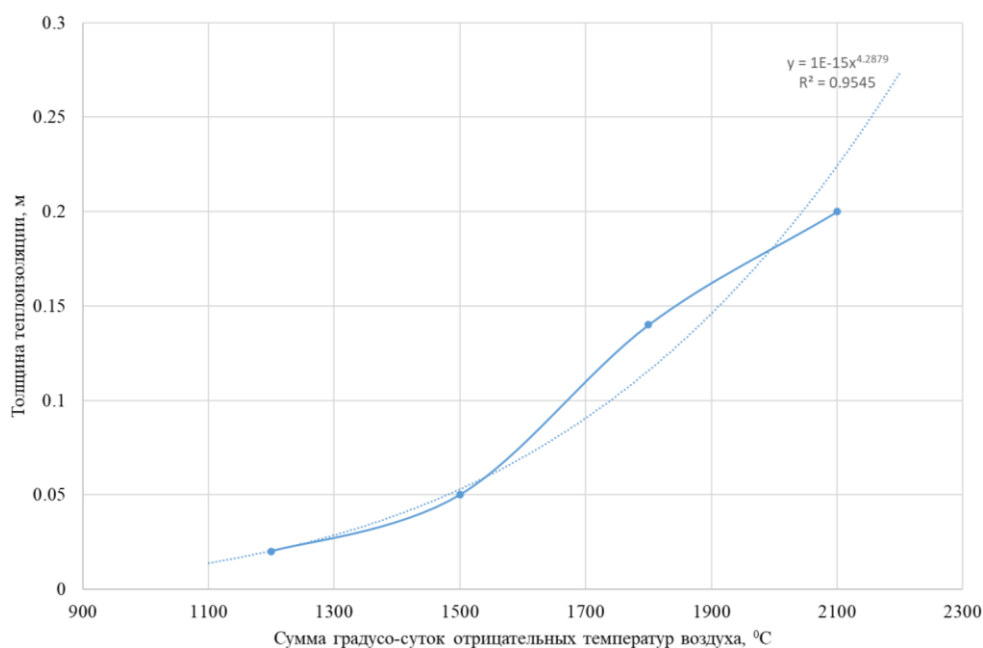
По полученным данным был построен график определения расчетной толщины теп-

лоизоляционного слоя в зависимости от суммы градусо-суток отрицательных температур в год (рис. 6).

**Таблица 6.** Результаты теплотехнических расчетов

**Table 6.** Results of thermal engineering calculations

Сумма градусо-суток отрицательных температур воздуха Sum of negative degree – days air temperatures	Толщина теплоизоляции, м Thickness thermal insulation, m	Температура грунта под теплоизолятором, °C Soil temperature under the thermal insulator, °C	Глубина промерзания, м Depth freezing, m	Величина морозного пучения, мм Size frosty heaving, mm
900 °C	0,05	–3,62	2,06	1,69
	0,1	–2,67	1,99	–
	0,15	–2,20	1,88	–
	0,2	–2,09	1,68	–
1 200 °C	0,05	–4,76	2,29	6,29
	0,1	–3,60	2,23	5,09
	0,15	–3,01	2,14	3,29
	0,2	–2,92	1,96	–
1 500 °C	0,05	–6,32	2,50	10,5
	0,1	–4,83	2,46	9,7
	0,15	–4,09	2,37	7,9
	0,2	–3,98	2,25	5,5
1 800 °C	0,05	–7,57	2,84	17,3
	0,1	–5,87	2,8	16,5
	0,15	–5,00	2,73	14,1
	0,2	–4,85	2,58	12,1
2 100 °C	0,05	–8,84	2,88	18,1
	0,1	–6,94	2,81	16,7
	0,15	–5,93	2,78	16,1
	0,2	–5,17	2,72	14,9



**Рис. 6.** Расчетная толщина теплоизоляционного слоя

**Fig. 6.** Calculated thickness of the thermal insulation layer

**Таблица 7.** Сферы применения теплоизоляционных плит из золошлаковых отходов  
**Table 7.** Application Areas of Heat Insulation Slabs Made from Ash and Slag Waste

Характеристика плит Slab Characteristics	Толщина защитного слоя над плитой, м Thickness of the Protective Layer Above the Slab	Толщина тепло-изоляционных плит, м Thickness of the Heat Insulation Slabs	Сумма градусо-суток отрицательных температур за год, °C Annual Sum of Degree-Days of Subzero Temperatures			
			1 200	1 500	1 800	2 100
			Категория железнодорожной линии Railway Line Category			
Ширина плиты 5 м, теплоемкость 0,0796 МДж/(м³·°C), теплопроводность 0,17 Вт/(м·°C) Slab width 5 m, heat capacity 0,0796 MJ/(m³·°C), thermal conductivity	0,1	0,05	Особогру-зонапря-женная, I–IV Particularly Heavy Traffic, I–IV	Особогру-зонапря-женная, I–IV Particularly Heavy Traffic, I–IV	I–IV	I–IV
		0,1			Особогру-зонапря-женная, I–IV Particularly Heavy Traffic, I–IV	Особогру-зонапря-женная, I–IV Particularly Heavy Traffic, I–IV
		0,15				
		0,2				

Вычисления расчетной толщины теплоизоляционного слоя проведены из условия предотвращения сверхнормативного морозного пучения грунтов вследствие воздействия на них отрицательных температур. Толщина допускаемого теплоизоляционного слоя из композиционных материалов определяется для каждого участка индивидуально в зависимости от категории железнодорожной линии и свойств грунтов, слагаемых земляное полотно [14].

отрицательных температур воздуха за год при защитном слое на покрытии равном 0,1 м. Расчеты проведены при разных климатических условиях. Определены сферы применения теплоизоляционных плит из ЗШО на основной площадке земляного полотна. Итоги работы сведены в табл. 7.

При сумме отрицательных температур более 2 100 °C потребуется увеличение толщины теплоизоляции. Данное утверждение следует проверять подробными расчетами.

## Заключение

Установлена зависимость толщины предлагаемого материала от суммы градусо-суток

## Список литературы

1. 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. (ред. 06.11.2024). Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс».
2. Мнения и оценки. Композиты приходят на железную дорогу // Гудок : сайт. URL : <https://gudok.ru/content/infrastructure/1571044/> (Дата обращения 18.08.2025).
3. Экспериментальная технология в геотехнике / С.Я. Луцкий, В.А. Шмелев, А.Ю. Бурукин и др. // Путь и путевое хозяйство. 2012. № 11. С. 17–20.
4. Кирпичников К.А., Дашинимаев З.Б., Баклаженко А.Г. Способ стабилизации земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты с применением инновационных материалов // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 92–96.
5. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Эксперименты по стабилизации земляного полотна на центральном участке Байкало-Амурской магистрали с помощью солнцесадкозащитных навесов // Инженерная геология. 2015. № 4. С. 56–63.
6. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Результаты опытно-экспериментальных работ по охлаждению многолетнемерзлых грунтов в основании железнодорожного пути на центральном участке БАМ // Материалы Пятой конференции геокриологов России. МГУ им. М.В. Ломоносова. М., 2016. Т. 1. С. 168–175.
7. Валиев Н.А. Термокомплекс, защита от деградации оснований земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы десятой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2019. Т. 1. С. 538–541.
8. Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи / Е.С. Ашпиз, Л.Н. Хрусталева, Л.В. Емельянова и др. // Криосфера земли. 2008. Т. 12. № 2. С. 84–89.

9. Сабельников К.И., Туманов Д.О. Недостатки содержания плит пенополистирола в условиях эксплуатации на железной дороге // Научный аспект. 2024. Т. 51. № 6. С. 6493–6499.
10. Утилизация паровозных шлаков в составах композиционных материалов для усиления земляного полотна железнодорожного пути / Н.Д. Шаванов, П.П. Панков, Д.В. Бесполитов и др. // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2024. № 1 (91). С. 63–73.
11. Туманов Д.О., Ковенькин Д.А. Анализ возможности применения материала на основе золошлаковых отходов для усиления основания земляного полотна // Железнодорожный транспорт и технологии (RTT-2023) : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2023. Вып. 1 (256). С. 160–163.
12. Шаванов Н.Д. Техничко-экономическое обоснование вовлечения золошлаковых отходов в дорожное строительство // Развитие малого предпринимательства в Байкальском регионе : материалы V междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2022. С. 247–252.
13. Коновалова Н.А., Мелешин Э.Е., Шаванов Н.Д. Изучение свойств золошлаковых смесей для утилизации в составах дорожно-строительных материалов // Биологические и географические аспекты экологии человека : материалы Всероссий. науч. конф. Сыктывкар, 2022. С. 60–64.
14. Иванов Е.В., Исаков А.Л., Сиротюк В.В. Экспериментальное исследование и математическое моделирование промерзания земляного полотна из золошлаковой смеси // Вестн. Сибир. гос. автомобил.-дорож. акад. 2013. № 3 (31). С. 71–76.
15. Frost 3D Universal Инженерные расчеты при проектировании на многолетнемерзлых грунтах // Научно-технический центр «Симмэйкерс» : сайт. URL : <https://simmakers.ru/wp-content/uploads/2014/03/teplotekhnicheskie-rashotiv-stroitelstve1.pdf> (Дата обращения: 26.08.2025).
16. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования : утв. приказом Минстроя РФ № 82/пр от 04.02.2019 (ред. 09.02.2023). Введ. 2019–08–05. М. : Минстрой России, 2019. 58 с.
17. СП 498.1325800.2020 Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории : утв. приказом Минстроя РФ № 910/пр от 30.12.2020. Введ. 2021–07–01. М. : Минстрой России, 2021. 42 с.
18. СП 119.13330.2024 Железные дороги колен 1520 мм : утв. приказом Минстроя РФ № 432/пр от 01.07.2024. Введ. 2024–08–02. М. : Минстрой России, 2024. 228 с.

## References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» (red. 06.11.2024) [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» (ed. November 6, 2024)].
2. Mneniya i otsenki. Kompozity prikhodyat na zheleznuyu dorogu (Elektronnyi resurs) [Opinions and ratings. Composites are coming to the railway (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/content/infrastructure/1571044/> (Accessed August 18, 2025).
3. Luts'kii S.Ya., Shmelev V.A., Burukin A.Yu., Khripkov K.N. Eksperimental'naya tekhnologiya v geotekhnike [Experimental technology in geotechnics]. *Put' i putevye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2012, no 11, pp. 17–20.
4. Kirpichnikov K.A., Dashinimaev Z.B., Baklazhenko A.G. Sposob stabilizatsii zemlyanogo polotna v raionakh rasprostraneniya vechnoi merzloty s primeneniem innovatsionnykh materialov [A method for stabilizing the roadbed in permafrost distribution areas using innovative materials]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t)* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2018. Vol. 1, pp. 92–96.
5. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Eksperimenty po stabilizatsii zemlyanogo polotna na tsentral'nom uchastke Baikalo-Amurskoi magistrali s pomoshch'yu solntseosadkozashchitnykh navesov [Experiments on the stabilization of the roadbed on the central section of the Baikal-Amur highway with the help of sunshade canopies]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], 2015, no. 4, pp. 56–63.
6. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Rezul'taty opytно-eksperimental'nykh rabot po okhlazhdeniyu mnogoletnemerzlykh gruntov v osnovanii zheleznodorozhnogo puti na tsentral'nom uchastke BAM [Results of experimental work on the cooling of permafrost soils at the base of the railway track on the central section of the Baikal-Amur magistral]. *Materialy Pyatoi konferentsii geokriologov Rossii* [Materials of the Fifth Conference of geocryologists of Russia]. Moscow, 2016, Vol. 1, pp. 168–175.
7. Valiev N.A. Termokompleks, zashchita ot degradatsii osnovanii zemlyanogo polotna na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Thermocomplex, protection from degradation of the foundations of the roadbed on permafrost soils]. *Materialy Desyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the Tenth International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2019, Vol. 1, pp. 538–541.
8. Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., Emel'yanova L.V., Vedernikova M.A. Ispol'zovanie sinteticheskikh teploizolyatorov dlya sokhraneniya merzlotnykh uslovii v osnovanii zheleznodorozhnoi nasypi [Using of synthetical thermal insulators for conservation of frozen soil conditions in the base of railway embankment]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2008, Vol. 12, no 2, pp. 84–89.
9. Sabel'nikov K.I. Tumanov D.O. Nedostatki soderzhaniya plit penopolistirola v usloviyakh ekspluatatsii na zheleznoi doroge [Disadvantages of the content of expanded polystyrene slabs in railway operation]. *Nauchnyi aspekt* [Scientific aspect], 2024, Vol. 51, no 6, pp. 6493–6499.
10. Shavanov N.D., Pankov P.P., Bespolitov D.V., Konovalova N.A., Evsyukov S.A., Avseenko N.D., Fatkulin A.A., Lushpei V.P. Utilizatsiya parovoznykh shlakov v sostavakh kompozitsionnykh materialov dlya usileniya zemlyanogo polotna

zheleznodorozhnogo puti [Recycling of steam slag in composite materials to strengthen railway subgrades]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Issues of modern science and practice. V.I. Vernadskii University], 2024, no 1 (91), pp. 63–73.

11. Tumanov D.O., Koven'kin D.A. Analiz vozmozhnosti primeneniya materiala na osnove zoloshlakovykh otkhodov dlya usileniya osnovaniya zemlyanogo polotna [Analysis of the possibility of using a material based on ash and slag waste to strengthen the foundation of the roadbed]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Zheleznodorozhnyi transport i tekhnologii (RTT-2023)»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Railway Transport and Technology (RTT-2023)»]. Ekaterinburg, 2023, iss. 1 (256), pp. 160–163.

12. Shavanov N.D. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vovlecheniya zoloshlakovykh otkhodov v dorozhnoe stroitel'stvo [Feasibility study of the involvement of ash and slag waste in road construction]. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitie malogo predprinimatel'stva v Baikal'skom regione»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Development of small business in the Baikal region»]. Irkutsk, 2022, pp. 247–252.

13. Konovalova N.A., Meleshin E.E., Shavanov N.D. Izuchenie svoistv zoloshlakovykh smesei dlya utilizatsii v sostavakh dorozhno-stroitel'nykh materialov [Researching of the properties of ash and slag mixtures for disposal in road construction materials]. *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Biologicheskie i geograficheskie aspekty ekologii cheloveka»* [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference «Biological and geographical aspects of human ecology»]. Syktyvkar, 2022, pp. 60–64.

14. Ivanov E.V., Isakov A.L., Sirotuk V.V. Eksperimental'noe issledovanie i matematicheskoe modelirovanie promerzaniya zemlyanogo polotna iz zoloshlakovoi smesi [Experimental investigation and mathematical modeling of freezing of an ground bed from an ash and slag mixture]. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy], 2013, no 3 (31), pp. 71–76.

15. Frost 3D Universal Inzhenernye raschety pri proektirovanii na mnogoletnemerzlykh gruntakh (Elektronnyi resurs) [Frost 3D Universal Engineering calculations in the design of permafrost soils (Electronic resource)]. Available at: <https://simmakers.ru/wp-content/uploads/2014/03/teplotechnicheskie-rashoti-v-stroitelstve1.pdf> (Accessed August 26, 2025).

16. SP 447.1325800.2019 Zheleznye dorogi v rayonakh vechnoi merzloty. Osnovnye polozeniia proektirovaniia (red. 09.02.2023) [Set of rules 447.1325800.2019 Railways in the permafrost areas. General positions of projecting (ed. February 9, 2023)]. Moscow: Minstroi Rossii Publ., 2019. 58 p.

17. SP 498.1325800.2020 Osnovaniia i fundamenti zdaniy i sooruzhenii na mnogoletnemerzlykh gruntakh. Trebovaniia k inzhenernoi podgotovke territorii [Set of rules 498.1325800.2020 Soil bases and foundations of buildings and structures on permafrost soils. Requirements for land development of the area]. Moscow: Minstroi Rossii Publ., 2020. 42 p.

18. SP 119.13330.2024 Zheleznye dorogi kolei 1520 mm [Set of Rules 119.13330.2024 Railways of 1520 mm gauge]. Moscow: Minstroi Rossii Publ., 2024. 228 p.

### Информация об авторах

**Ковенькин Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kovenkin\_da@irgups.ru.

**Туманов Дмитрий Олегович**, аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: tumanov.dmitry2014@yandex.ru.

**Ходырев Юрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: hod1959@mail.ru.

### Information about the authors

**Dmitrii A. Koven'kin**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kovenkin\_da@irgups.ru.

**Dmitrii O. Tumanov**, Ph.D. Student of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: tumanov.dmitry2014@yandex.ru.

**Yurii A. Khodyrev**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: hod1959@mail.ru.



## Нетрадиционный способ заряда бортовой аккумуляторной батареи мультикоптера

К.К. Ким, Е.Б. Королева✉, М.В. Михайлов, Д.Я. Монастырский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉elzazybina@yandex.ru

### Резюме

Одним из основных недостатков беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа является ограниченность емкости бортовой аккумуляторной батареи. Для осуществления ее подзаряда требуется прекращение полета и возвращение летательного аппарата на базу. В статье рассматривается нетрадиционный способ заряда бортовой аккумуляторной батареи мультикоптера за счет энергии внешнего электромагнитного поля, созданного сторонними источниками, например токами, протекающими по контактному проводу электрифицированного железнодорожного транспорта или по высоковольтным проводам воздушных линий электропередач. Процесс передачи энергии на борт мультикоптера происходит бесконтактно (индукционно) во время его полета в непосредственной близости от источника магнитного поля. Технически это выполняется с помощью электрической катушки, установленной на борту летательного аппарата, и подсоединенной к блоку заряда аккумуляторной батареи. Повышение эффективности заряда батареи в светлое время суток также достигается с помощью солнечной панели, расположенной на аппарате. Для исследования предложенного способа заряда и подтверждения его результативности была построена математическая модель в пакете COMSOL Multiphysics 6.2 с использованием метода конечных элементов, с помощью которой в дальнейшем выполнялся расчет электродвижущей силы, наводимой в бортовой электрической катушке. Получен ряд зависимостей величины наведенной электродвижущей силы от геометрических размеров, числа витков бортовой электрической обмотки, расстояния до контактного провода контактной сети переменного тока напряжением 27,5 кВ. Достоверность результатов расчета доказана исследованиями на экспериментальных стендах.

### Ключевые слова

беспилотный летательный аппарат, аккумуляторная батарея, беспроводной заряд, электромагнитное поле, индукционный способ

### Для цитирования

Нетрадиционный способ заряда бортовой аккумуляторной батареи мультикоптера / К.К. Ким, Е.Б. Королева, М.В. Михайлов, Д.Я. Монастырский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 64–71. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).64-71.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.09.2025 г.; поступила после рецензирования: 15.09.2025 г.; принята к публикации 16.09.2025 г.

### Благодарность

Исследование выполнялось в рамках научного проекта № 24-29-00159 по гранту Российского научного фонда на 2024–2025 гг. по результатам конкурса 2023 г. «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами».

## An unconventional way to charge the onboard battery of a multicopter

K.K. Kim, E.B. Koroleva✉, M.V. Mikhailov, D.Ya. Monastyrskii

Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg, the Russian Federation

✉elzazybina@yandex.ru

### Abstract

One of the main disadvantages of multi-rotor unmanned aerial vehicles is the limited capacity of their onboard battery, which requires recharging, i.e., stopping the flight and returning the vehicle to its base. This article proposes an unconventional method of charging the onboard battery of a multicopter using the energy of an external electromagnetic field generated by external sources, such as currents flowing through the contact wire of electrified rail transport or high-voltage wires of overhead power lines. Energy is transferred to the multicopter's board in the contactless mode (inductively) during its flight in close proximity to the magnetic field source. Technically, this is carried out using an electric coil installed on board the aircraft and connected to the battery charging unit. Increasing the efficiency of battery charging during daylight hours is also achieved using a solar panel located on the aircraft. To confirm and investigate the proposed charging method, a mathematical model was created in the COMSOL Multiphysics® 6.2 package using the finite element method, which was then used to calculate the electromotive force induced in the onboard electric coil. A

number of dependencies of the induced electromotive force value on the geometric dimensions, the number of turns of the onboard electrical winding, the distance to the contact wire of the AC contact network with a voltage of 27,5 kV. The reliability of the obtained calculation results is confirmed by experimental studies on experimental stands.

### Keywords

unmanned aerial vehicle, battery pack, wireless charging, electromagnetic field, the induction method

### For citation

Kim K.K., Koroleva E.B., Mikhailov M.V., Monastyrskii D.Ya. Netraditsionnyi sposob zaryada bortovoi akkumulyatornoi batarei mul'tikoptera [An unconventional way to charge the onboard battery of a multicopter]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2025. № 3 (87). Pp. 64–71. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).64-71.

### Article Info

Received: September 9, 2025; Revised: September 15, 2025; Accepted: September 16, 2025.

### Acknowledgement

The research was carried out within the framework of scientific project No 24-29-00159 within the framework of a grant provided by the Russian Science Foundation for 2024–2025 based on the results of the 2023 competition «Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by small individual scientific groups».

### Введение

События последних лет подтвердили эффективность применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как в военных, так и в гражданских целях (например, в сельском хозяйстве, природопользовании, системе правопорядка, транспортной безопасности, железнодорожном транспорте и пр.) [1–8]. В данной работе рассматривается вопрос применения БПЛА мультироторного типа для мониторинга объектов инфраструктуры на территориях с действующей энергосистемой или электрифицированным железнодорожным транспортом.

Несмотря на развитие технологий в аккумуляторной области, одним из недостатков БПЛА мультироторного типа является ограниченность емкости аккумуляторной батареи, что требует частого заряда аккумуляторных батарей, а значит и прекращения полетного задания.

Для увеличения времени выполнения полетных заданий мультикоптеров используют различные способы, например установку на борту аппарата аккумуляторных батарей большей емкости либо размещение зарядных станций по заданному маршруту полета [9, 10] и солнечных панелей на борту [11]. В настоящее время также разрабатываются различные способы беспроводного заряда бортовых аккумуляторных батарей [12–15].

Авторами предлагается нетрадиционный способ заряда бортовой аккумуляторной батареи мультикоптера во время полета, в основе которого лежит беспроводной (индукционный) способ заряда за счет энергии внешнего элек-

ромагнитного поля, созданного сторонними источниками, например токами, протекающими по контактному проводу электрифицированного железнодорожного транспорта или по проводам воздушных линий электропередач энергосистемы [16, 17].

Цель данной работы заключается в подтверждении возможности реализации и практического использования данного способа заряда бортовых аккумуляторных батарей во время полета БПЛА рядом с контактным проводом контактной сети переменного тока напряжением 27,5 кВ (50 Гц).

### Конструктивные решения беспроводного способа заряда бортовой аккумуляторной батареи беспилотных летательных аппаратов

На рис. 1 приведена конструкция БПЛА (квадрокоптера) с возможностью беспроводного заряда бортовой аккумуляторной батареи в режиме полета.

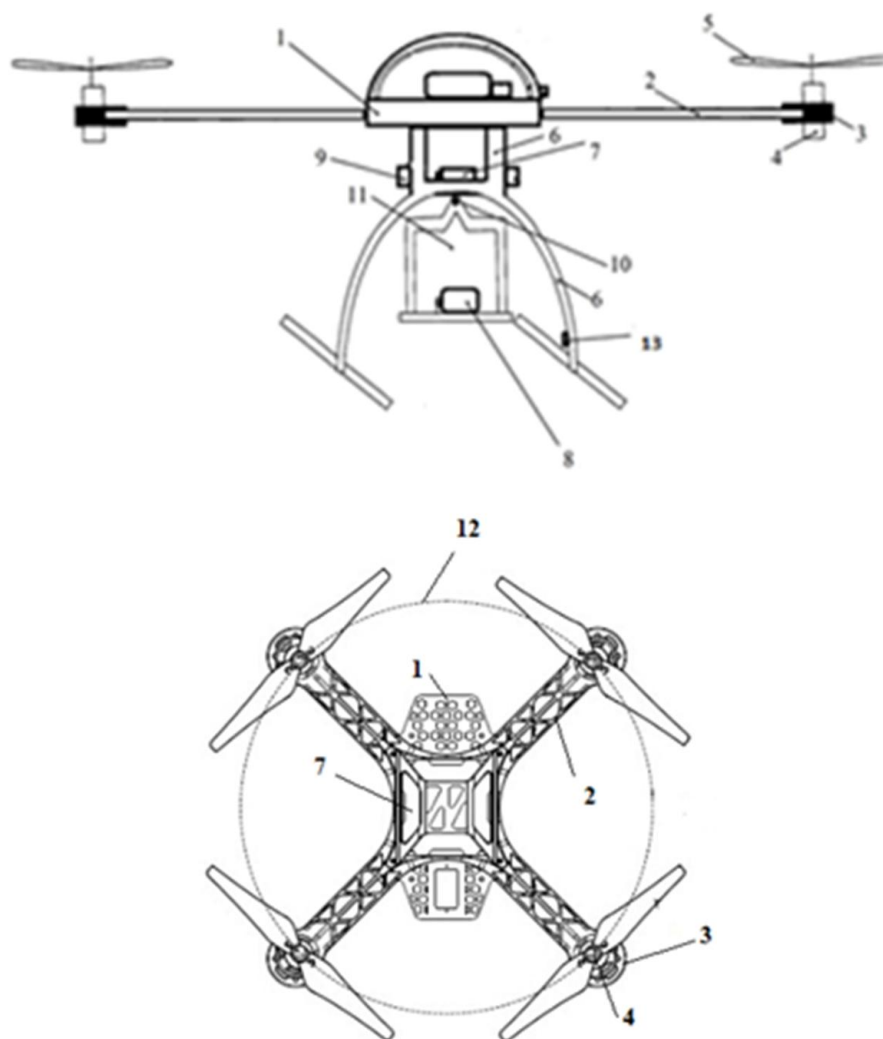
К каркасу летательного аппарата с помощью радиальных штанг прикреплены приводные электродвигатели. Бортовая аккумуляторная батарея, расположенная на раме БПЛА, электрически соединена через регулятор оборотов с приводными электродвигателями. Снизу шасси посредством шарнирного механизма прикреплен поворотный-наклонный гиростабилизированный подвес с устройством видеонаблюдения.

Бортовая электрическая обмотка (БЭО) установлена на габаритном кольце, которое прикреплено внутренней поверхностью к корпусам электрических двигателей.

В случае разряда аккумуляторной батареи БПЛА сближается с проводами контактной сети электрифицированных железных дорог или высоковольтной линии энергосистемы, расположение которых определяется оператором либо по координатам, заложенным в программе полета. Сближение с проводами и удержание дистанции между БПЛА и токонесящим проводом контролируется датчиком напряженности электромагнитного поля, который срабатывает при напряженности, равной,

например, 0,27 кВ/см (соответствует дистанции примерно в 1 м). Сигнал с датчика поступает на бортовую систему обеспечения (на рис. 1 не показана), которая управляет работой приводных двигателей. В результате БПЛА «зависает» рядом с проводом или продолжает полет вдоль него по определенной траектории.

Второе условие является обязательным в случае воздушных линий электропередачи или контактной сети постоянного тока.



**Рис. 1.** Конструкция беспилотного летального аппарата с бортовой электрической обмоткой:  
1 – каркас; 2 – штанга; 3 – крепления; 4 – приводные электродвигатели; 5 – воздушные винты; 6 – шасси;  
7 – аккумуляторная батарея; 8 – устройство видеонаблюдения; 9 – регулятор оборотов; 10 – шарнир;  
11 – гиростабилизированный подвес; 12 – бортовая электрическая обмотка;  
13 – датчик напряженности электромагнитного поля

**Fig. 1.** Unmanned aerial vehicle design with onboard electrical winding:  
1 – frame; 2 – rod; 3 – fasteners; 4 – drive electric motors; 5 – propellers; 6 – chassis;  
7 – battery; 8 – video surveillance device; 9 – speed controller; 10 – hinge; 11 – gyro-stabilized suspension;  
12 – onboard electrical winding; 13 – electromagnetic field sensor

Электромагнитное поле, порожденное электрическими токами в проводах контактной сети электрифицированных железных дорог или проводах высоковольтных линий энергосистемы (источник энергии), индуцирует ЭДС в БЭО (приемник энергии), выводы которой подключены к электрической цепи заряда бортовой аккумуляторной батареи.

Устройство контроля заряда аккумуляторной батареи подключает зарядную БЭО через блок управления зарядом к выводам аккумуляторной батареи.

Под действием наводимой ЭДС в БЭО БПЛА, а, следовательно, и в аккумуляторной батарее, начинают протекать токи. Таким образом происходит подзаряд аккумуляторной батареи. При достижении необходимого уровня напряжения заряда устройство управления зарядом отключает БЭО от аккумуляторной батареи и заряд прекращается. Мультикоптер продолжает выполнять свое полетное задание.

### Результаты эксперимента

Для проверки данного способа беспроводного подзаряда аккумуляторной батареи БПЛА были проведены экспериментальные исследования процесса наведения ЭДС в БЭО.

При этом варьировались следующие параметры БЭО: диаметр, число витков, форма и сечение провода. Внешнее магнитное поле создавалось переменным электрическим током 15 А (50 Гц), протекающим по прямолинейному проводу.

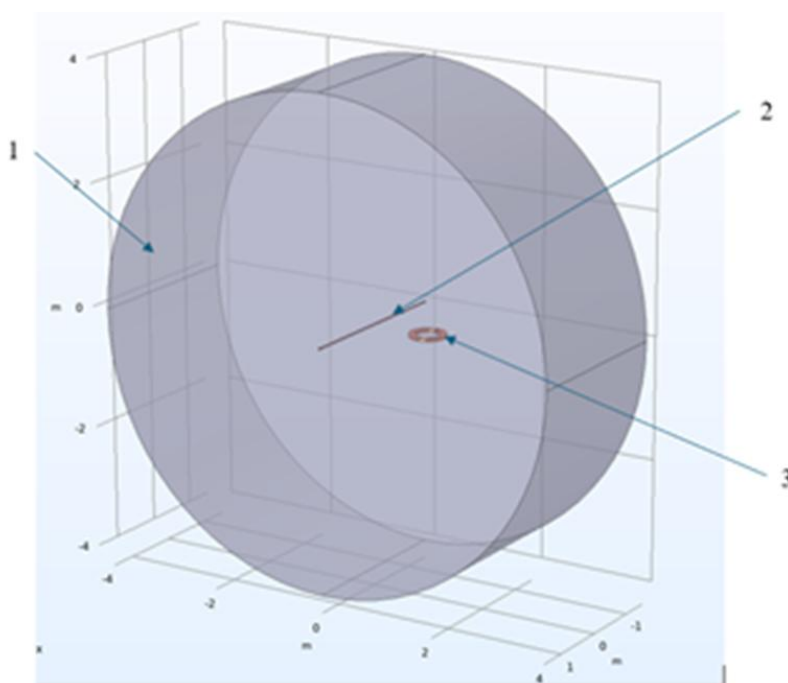
Как и следовало ожидать, эффективность подзаряда аккумуляторной батареи напрямую зависела от диаметра БЭО.

Несимметричное положение БЭО относительно провода с током приводило к появлению высших гармоник в кривой, наводимой ЭДС. Данный факт привел к необходимости использования LC-фильтров в зарядном блоке.

### Математическое моделирование

Математическое моделирование проводилось в пакете COMSOL Multiphysics 6.2 с применением метода конечных элементов [18–21]. Расчетная модель для простого типа контактной подвески представлена на рис. 2.

Исходя из требуемого значения зарядного напряжения бортовой аккумуляторной батареи определялись параметры БЭО. Расчеты проводились при фиксированных величинах расстояния между контактным проводом и БЭО ( $h$ ) и продольной скорости полета БПЛА ( $v$ ). Значения  $v$  выбирались из диапазона от 2 до 10 км/ч.



**Рис. 2.** Построение математической модели:

1 – расчетная область; 2 – контактный/высоковольтный провод; 3 – бортовая электрическая обмотка

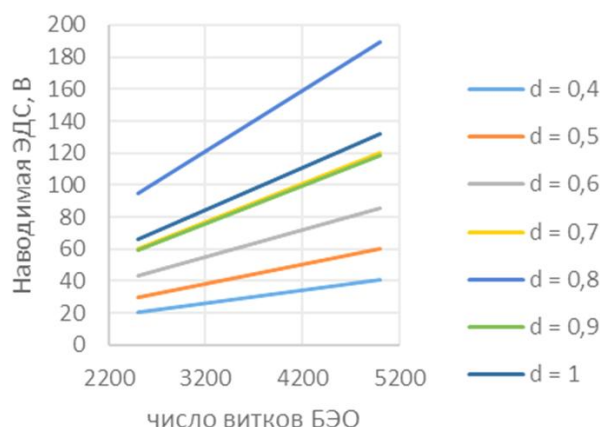
**Fig. 2.** Construction of a mathematical model:

1 – calculation area; 2 – contact/high-voltage wire; 3 – onboard electrical winding

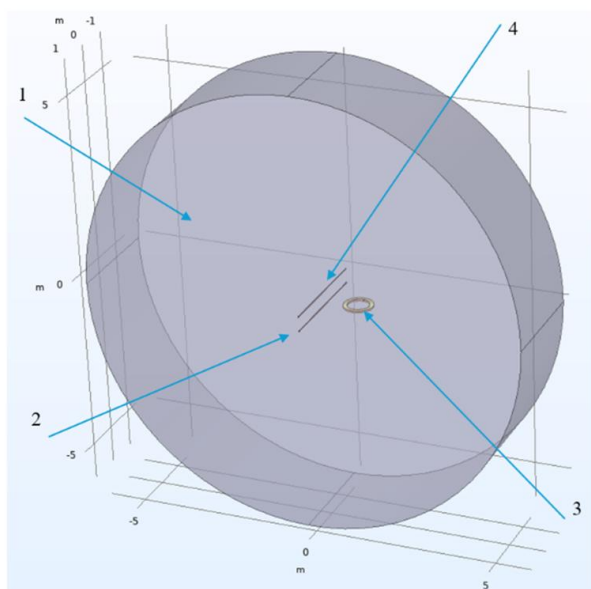
При этом принималось, что по контактному проводу протекает переменный ток с амплитудным значением 300 А. Наиболее подробно результаты расчетов приведены в [22, 23].

Также были определены зависимости величины наводимой ЭДС от числа витков БЭО при различных диаметрах обмотки ( $d$ ) (рис. 3). Можно видеть, что данные зависимости имеют линейный характер. Кроме простой контактной подвески, моделировался вариант использования для подзаряда цепной одинарной контактной подвески.

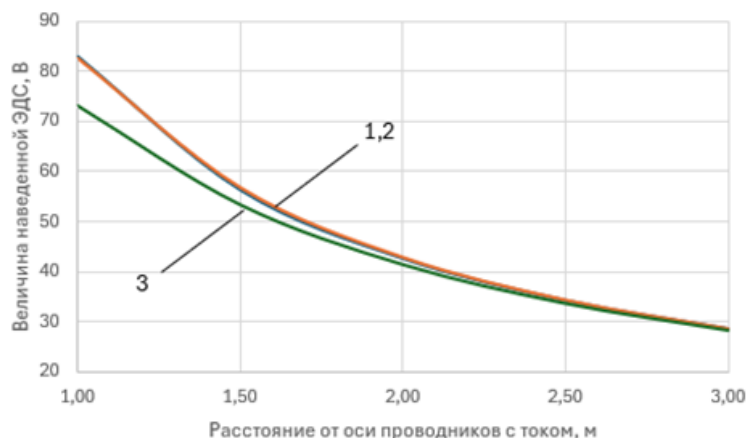
В этом случае математическое моделирование заряда аккумуляторной батареи БПЛА с БЭО проводилось с учетом несущего троса, по которому, как показали расчеты, может протекать ток величиной до 50 % от тока контактного провода (рис. 4). Предполагалось, что БЭО находится в одной горизонтальной плоскости с несущим тросом (справа от него) и траектория полета аппарата параллельна продольной оси прямолинейного несущего троса. Токи в контактном проводе и несущем тросе принимались равными 500 А и 158,83 А соответственно.



**Рис. 3.** Зависимость величины наводимой ЭДС от числа витков при различных диаметрах бортовой электрической обмотки  
**Fig. 3.** Dependence of the induced EMF on the number of turns at the different diameters of the board electrical winding



**Рис. 4.** Построение математической модели с учетом несущего троса контактной подвески:  
 1 – расчетная область; 2 – контактный провод; 3 – электрическая обмотка; 4 – несущий трос  
**Fig. 4.** Construction of a mathematical model taking into account the contact suspension cable:  
 1 – calculation area; 2 – contact wire; 3 – electrical winding; 4 – contact suspension cable



**Рис. 5.** Зависимость величины наведенной ЭДС в бортовой электрической обмотке от расстояния до источника электромагнитного поля (контактной сети переменного тока):

1 – бортовая электрическая обмотка на уровне контактного провода; 2 – бортовая электрическая обмотка равноудалена от контактного провода и несущего троса; 3 – бортовая электрическая обмотка на уровне несущего троса

**Fig. 5.** Dependence of the induced EMF value in the BEW on the distance to the electromagnetic field source (AC contact network):

1 – board electrical winding at the level of the contact wire; 2 – board electrical winding equidistant from the contact wire and the supporting cable; 3 – board electrical winding at the level of the supporting cable

Расчеты проводились для разных расстояний между БЭО и несущим тросом. По результатам расчетов построена зависимость (рис. 5, кривая 3).

Моделирование показало, что передача энергии будет наиболее эффективна, если БПЛА будет располагаться сбоку от контактного провода: в этом случае при числе витков в бортовой обмотке, равном, например, 3 880 и ее диаметре 0,9 м, величина наведенной ЭДС составит  $\approx 80$  В (рис. 5, кривые 1 и 2). Если же БПЛА находится на уровне несущего троса, то наводимая ЭДС уменьшается до  $\approx 73$  В.

Исследования показали, что необходимое значение наводимой ЭДС можно получить с помощью конструктивных мер (выбором диаметра БЭО) или установлением вида траектории полета (изменением расстояния от источника внешнего электромагнитного поля – кон-

тактного или несущего провода до приемника энергии – БЭО БПЛА).

### Заключение

1. Результаты исследований и расчетов подтвердили реальную возможность использования данного способа беспроводного подзаряда аккумуляторной батареи БПЛА при наличии источника внешнего электромагнитного поля.

2. Выполнена оценка величины наводимой ЭДС в БЭО летательного аппарата в зависимости от ее параметров, геометрических размеров и расположения относительно источника внешнего электромагнитного поля.

3. Данный способ может быть рекомендован для увеличения времени непрерывного полета БПЛА при мониторинге протяженных инфраструктурных электрифицированных объектов.

### Список литературы

1. Цифровая трансформация сельского хозяйства на основе беспилотных летательных аппаратов / С.В. Шайтура, М.Д. Князева, Л.П. Белю и др. // Вестн. Курск. гос. с.-х. акад. 2021. № 7. С. 174–182.
2. Уланов С.И., Криводубский О.А., Никитина А.А. Анализ возможностей применения летательных аппаратов в контроле состояния местности // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 1 (32). С. 94–102.
3. Шпенст В.А., Морозова О.Ю., Белошицкий А.А. Устройства для диагностики объектов электроэнергетики с помощью беспилотных авиационных систем // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 6. С. 503–508.
4. Голиков Д.В. К вопросу о возможностях программы автономных беспилотных авиационных систем в интересах правоохранительных органов // Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. М., 2025. С. 140–145.
5. Устинов С.Д. Использование беспилотных летательных аппаратов для борьбы с лесными пожарами // Экология и экологическое образование в современном мире : материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. Орехово-Зуево, 2024. С. 132–137.
6. Кореньков Д.А. Система диагностирования в ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2023. № 12. С. 18–22.

7. Потапов Г.Ю., Софин А.В., Большаков Р.С. Возможности использования технологий беспилотных летательных аппаратов на Восточно-Сибирской железной дороге // Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). С. 169–175.
8. Костюченко К.Л., Фараносов Д.А. Беспилотные мобильные средства: инновации и угрозы // Инновационный транспорт. 2024. № 1 (51). С. 36–41.
9. Михайлов М.В., Соловьев А.С., Монастырский Д.Я. Применение беспилотных летательных аппаратов с увеличенной дальностью полета для контроля состояния инфраструктуры железнодорожного высокоскоростного транспорта // VI Бетанкуровский межд. инженерный форум : сб. тр. СПб., 2024. Т. 2. С. 55–59.
10. Пат. № 2837679 Рос. Федерация. Система посадки беспилотного летательного аппарата вертикального взлета и посадки / К.К. Ким, Е.Б. Королева, М.В. Михайлов и др. № 2024120739 ; заявл. 18.07.2024 ; опубл. 03.04.2025, Бюл. № 10. 13 с.
11. Назаренко П.А., Сатарова В.И., Макарова Л.В. Модель БПЛА на солнечной энергии // Изв. Тул. гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 10. С. 44–51.
12. Никитин В.В., Васильев В.А., Чжао Т. Бесконтактная передача энергии на экипажи высокоскоростного магнито-левитационного транспорта // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 1. С. 23–26.
13. Liu Y., Zhang B., Zeng Ya. High-Efficiency Wireless Charging System for UAVs Based on PT-Symmetric Principle // Drones and Autonomous Vehicles. 2025. Vol. 2. Iss. 2. DOI : 10.70322/dav.2025.10008.
14. Electromagnetic Field Based WPT Technologies for UAVs. A Comprehensive Survey / M.T. Nguyen, C.V. Nguyen, L.H. Truong et al. // Electronics. 2020. Vol. 9. Iss. 3. DOI : 10.3390/electronics9030461.
15. Энергия по лазеру: проект энергоснабжения коптера от китайских инженеров // Военное обозрение : сайт. URL : <https://topwar.ru/209979-jenergija-po-lazeru-proekt-jenergiosnabzhenija-koptera-ot-kitajskih-inzhenerov.html> (дата обращения: 21.05.25).
16. Пат. № 042897 Евразийское патентное ведомство. Беспилотный летательный комплекс / К.К. Ким. № 202000255 ; заявл. 30.07.2020 ; опубл. 31.03.2023, Бюл. № 3. 6 с.
17. Ким К.К., Королева Е.Б., Ткачук А.А. Беспилотные электрические летательные аппараты и комплексы для мониторинга на железнодорожном транспорте // Транспорт Российской Федерации. 2024. № 6 (115). С. 44–51.
18. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде Comsol Multiphysics 5.2 / А.В. Коваленко, А.М. Узденова, М.Х. Ургенов и др. СПб : Лань, 2022. 228 с.
19. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М. : Наука, 1989. 432 с.
20. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 541 с.
21. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей : Справочная книга. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
22. Беспилотный летательный аппарат для мониторинга контактной сети переменного тока / К.К. Ким, Е.Б. Королева, П.К. Рыбин и др. // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 463–476.
23. Математическое моделирование бесконтактного процесса подзаряда аккумуляторной батареи мультикоптера от внешнего электромагнитного поля / К.К. Ким, Е.Б. Королева, А.С. Батаев и др. // Вестн. Москов. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2024. № 4 (151). С. 28–46.

## References

1. Shaitura S.V., Knyazeva M.D., Belyu L.P., Barbasov V.K., Feoktistova V.M. Tsifrovaya transformatsiya sel'skogo khozyaystva na osnove bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Digital transformation of agriculture based on unmanned aerial vehicles]. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaystvennoi akademii* [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy], 2021. no 7, pp. 174–182.
2. Ulanov S.I., Krivodubskii O.A., Nikitina A.A. Analiz vozmozhnostei primeneniya letatel'nykh apparatov v kontrole sostoyaniya mestnosti [Analysis of the possibilities of using aircraft in monitoring the condition of the terrain]. *Problemy isskusstvennogo intellekta* [Problems of artificial intelligence], 2024, no 1 (32), pp. 94–102.
3. Shpenst V.A., Morozova O.Yu., Beloshitskii A.A. Ustroystva dlya diagnostiki ob'ektov elektroenergetiki s pomoshch'yu bespilotnykh aviatsionnykh sistem [Devices for diagnostics of electric power facilities using unmanned aircraft systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Bulletins of higher educational organizations. Instrument engineering], 2021, Vol. 64, no 6, pp. 503–508.
4. Golikov D.V. K voprosu o vozmozhnastyakh programmy avtonomnykh bespilotnykh aviatsionnykh sistem v interesakh pravo-okhranitel'nykh organov [On the question of the possibilities of the autonomous unmanned aircraft systems program in the interests of law enforcement agencies]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Informatizatsiya i informatsionnaya bezopasnost' pravookhranitel'nykh organov»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Informatization and information security of law enforcement agencies»]. Moscow, 2025, pp. 140–145.
5. Ustinov S.D. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya bor'by s lesnymi pozharemi [The use of unmanned aerial vehicles to fight forest fires]. *Materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Ekologiya i ekologicheskoe obrazovanie v sovremennom mire»* [Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference «Ecology and environmental education in the modern world»]. Orekhovo-Zuyevo, 2024, pp. 132–137.
6. Koren'kov D.A. Sistema diagnostirovaniya v OAO «RZHD» [Diagnostic system in JSC «Russian Railways»]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no 12, pp. 18–22.
7. Potapov G.Yu., Sofin A.V., Bol'shakov R.S. Vozmozhnosti ispol'zovaniya tekhnologii bespilotnykh letatel'nykh apparatov na Vostochno-Sibirskoi zheleznoi doroge [The possibilities of using unmanned aerial vehicle technologies on the East Siberian Railway]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no 1 (11), pp. 169–175.
8. Kostyuchenko K.L., Faranoso D.A. Bespilotnye mobil'nye sredstva: innovatsii i ugrozy [Unmanned mobile vehicles: innovations and threats]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2024, no 1 (51), pp. 36–41.
9. Mikhailov M.V., Solov'ev A.S., Monastyrskii D.Ya. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov s uvelichennoi dal'nost'yu poleta dlya kontrolya sostoyaniya infrastruktury zheleznodorozhnogo vysokoskorostnogo transporta [The use of un-



manned aerial vehicles with extended flight range to monitor the state of the infrastructure of high-speed railway transport]. *Sbornik trudov «VI Betankurovskii mezhdunarodnyi inzhenernyi forum»* [Proceedings «VI Betancourt International Engineering Forum»]. Saint Petersburg, 2024, Vol. 2, pp. 55–59.

10. Kim K.K., Koroleva E.B., Mikhajlov M.V., Solov'ev A.S. Patent RU 2837679 C1, 03.04.2025.

11. Nazarenko P.A., Satarova V.I., Makarova L.V. Model' BPLA na solnechnoi energii [A solar-powered UAV model]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of Tula State University. Technical sciences], 2021, no 10, pp. 44–51.

12. Nikitin V.V., Vasil'ev V.A., Zhao T. Beskontaktnaya peredacha energii na ekipazhi vysokoskorostnogo magnitolevitatsionnogo transporta [Contactless energy transfer to crews of high-speed magnetolevitation transport]. *Elektronika i elektrobudovaniye transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2022, no 1, pp. 23–26.

13. Liu Y., Zhang B., Zeng Ya. High-Efficiency Wireless Charging System for UAVs Based on PT-Symmetric Principle // *Drones and Autonomous Vehicles*, 2025, Vol. 2, iss. 2. DOI : 10.70322/dav.2025.10008.

14. Nguyen M.T., Nguyen C.V., Truong L.H., Le A.M., Quyen T.V., Masaracchia A., Teague K.A. Electromagnetic Field Based WPT Technologies for UAVs. A Comprehensive Survey // *Electronics*, 2020, Vol. 9, iss. 3. DOI : 10.3390/electronics9030461.

15. Energiya po lazeru: proekt energosnabzheniya koptera ot kitaiskikh inzhenerov (Elektronnyi resurs) [Laser Energy: a copter power supply project from Chinese engineers (Electronic resource)]. Available at: <https://topwar.ru/209979-jenergiya-po-lazeru-proekt-jenergosnabzheniya-koptera-ot-kitaiskikh-inzhenerov.html> (Accessed May 21, 2025).

16. Kim K.K. Patent 042897 B1, 31.03.2023.

17. Kim K.K., Koroleva E.B., Tkachuk A.A. Bepilotnye elektricheskie letatel'nye apparaty i komplekсы dlya monitoringa na zheleznodorozhnom transporte [Unmanned electric aircraft and complexes for monitoring on railway transport]. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. The journal about science, practice, and economics], 2024, no, 6 (115), pp. 44–51.

18. Kovalenko A.V., Uzenova A.M., Urtenov M.KH., Nikonenko V.V. Matematicheskoe modelirovanie fiziko-khimicheskikh protsessov v srede Comsol Multiphysics 5.2 [Mathematical modeling of physico-chemical processes in the Comsol Multiphysics 5.2 environment]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2022. 228 p.

19. Samarskii A.A., Gulina A.V. Chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow: Nauka Publ., 1989. 432 p.

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

21. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. Raschet induktivnosti: Spravochnaya kniga [Calculation of inductors: a reference book]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p.

22. Kim K.K., Koroleva E.B., Rybin P.K., Stepanskaya O.A. Bepilotnyi letatel'nyi apparat dlya monitoringa kontaktnoi seti peremennogo toka [An unmanned aerial vehicle for monitoring an AC contact network]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Innovative transport systems and technologies], 2024, Vol. 10, no 4, pp. 463–476.

23. Kim K.K., Koroleva E.B., Vataev A.S., Mikhailov M.V., Solov'ev A.S. Matematicheskoe modelirovanie beskontaktnogo protsessa podzaryada akkumulyatornoi batarei mul'tikoptera ot vneshnego elektromagnitnogo polya [Mathematical modeling of the contactless process of charging a multicopter battery from an external electromagnetic field]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye* [Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Mechanical Engineering Series], 2024, no 4 (151), pp. 28–46.

### Информация об авторах

**Ким Константин Константинович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники и энергетики, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: kimkk@inbox.ru.

**Королева Елена Борисовна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретических основ электротехники и энергетики, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: elzabybina@yandex.ru.

**Михайлов Михаил Владимирович**, аспирант кафедры теоретических основ электротехники и энергетики, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: mihanikk2001@gmail.com.

**Монастырский Дмитрий Ярославович**, аспирант кафедры теоретических основ электротехники и энергетики, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: swen\_88@mail.ru.

### Information about the authors

**Konstantin K. Kim**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: kimkk@inbox.ru.

**Elena B. Koroleva**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: elzabybina@yandex.ru.

**Mikhail V. Mikhailov**, Ph.D. Student of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: mihanikk2001@gmail.com.

**Dmitrii Ya. Monastyrskii**, Ph.D. Student of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: swen\_88@mail.ru.



## Усиление технического оснащения четной системы железнодорожной станции как ключевой фактор прироста пропускных и перерабатывающих мощностей Восточного полигона

Ю.И. Белоголов✉, М.В. Малова

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

✉belogolov\_yi@irgups.ru

### Резюме

В статье рассматривается уровень и качество технического оснащения четной системы сортировочной станции Восточного полигона железнодорожных дорог. Комплексный анализ работы, в основу которого положены статистические данные, относящиеся к пропускной и перерабатывающей способностям станции, позволил выявить несоответствие технологии функционирования четной системы и действующего технологического процесса, который является ключевым нормативным документом при обеспечении слаженной, бесперебойной работы. Обнаруженное несоответствие является следствием «принятой» технологии работы на станции и связано с отсутствием здесь горочного локомотива серии ТЭМ14, а также его временной заменой снимаемым с четного парка станции тепловозом серии ТЭМ18. Технологический процесс предусматривает, что в среднем за сутки в парк приема станции прибывает четыре поезда, в составе которых имеются вагоны с отметкой «запрещено спускать с горки», а также шесть поездов повышенного веса, что в общем объеме прибытия грузовых поездов, прибывающих в расформирование, составляет 34 %. Согласно статистике за 2023–2025 гг. по приему поездов на ст. Иркутск-Сортировочный, среднее количество обрабатываемых составов с вагонами, имеющими отметку «запрещено спускать с горки», варьируется от трех до шести в сутки, а доля поездов повышенного веса доходит до 40 %. Эти факторы свидетельствуют о том, что требуются значительные временные затраты на работу горочных локомотивов серии ВЛ65 по расформированию поездов указанных категорий, что увеличивает время простоя остальных грузовых поездов в ожидании текущих технологических операций. Существует также проблема занятости путей станции вследствие ожидания подачи горочного локомотива, которое примерно составляет более трех часов. Выявленное нарушение технологических циклов процесса расформирования поездов приводит к тому, что в определенный промежуток времени свободных путей на станции не остается, что делает невозможным прием поездов для производства необходимых технологических операций. В данном исследовании рассмотрен комплекс мероприятий, направленных на усиление технического оснащения четной системы железнодорожной станции, прирост пропускных и перерабатывающих мощностей Восточного полигона железных дорог.

### Ключевые слова

Восточный полигон железных дорог, техническое оснащение железнодорожной станции, сокращение времени простоя, маневровый локомотив ТЭМ14, тяжеловесные поезда, пропускные и перерабатывающие мощности

### Для цитирования

Белоголов Ю.И. Усиление технического оснащения четной системы железнодорожной станции как ключевой фактор прироста пропускных и перерабатывающих мощностей Восточного полигона / Ю.И. Белоголов, М.В. Малова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 72–81. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).72-81.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 04.09.2025 г.; поступила после рецензирования: 10.09.2025 г.; принята к публикации: 11.09.2025 г.

## Strengthening the technical equipment of the even-numbered railway station system as a key factor in increasing the throughput and processing capacities of the Eastern polygon

Yu. I. Belogolov✉, M.V. Malova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉belogolov\_yi@irgups.ru

### Abstract

This article examines the level and quality of technical equipment in the even-numbered system of the Eastern Railway Polygon marshalling yard. A comprehensive analysis of the operation, based on statistical data related to the yard's handling capacity, revealed a discrepancy between the operating technology of the even-numbered system and the existing technological process, which is a key regulatory document for ensuring smooth and uninterrupted operation. This discrepancy is a consequence of the «accepted» operating technology at the yard and is related to the absence of a TEM14 hump locomotive, as well as its temporary replacement with a TEM18 diesel locomotive, which is being removed from the yard's even-numbered fleet. The operational process assumes that, on average, four trains containing wagons marked «not to be lowered from the hump», as well as six overweight trains, arrive at the station's receiving yard per

day which makes 34%. According to statistics for 2023–2025 on train reception at the Irkutsk-Sortirovochny station, the average number of trains processed with wagons marked «not to be lowered from the hump» varies from 3 to 6 per day, and overweight trains account for up to 40%. These factors indicate that significant operating time is required for VL65 series hump locomotives to dismantle trains of these categories, leading to increased downtime for the remaining freight trains awaiting ongoing operations. Furthermore, there is the issue of track occupancy due to the wait for a hump locomotive, which averages over three hours. The identified disruption to the technological cycles of the dismantling process results in a situation where, during a certain period of time, there are no free tracks at the station, and the scheduled train flow makes it impossible to accept trains at the station for the necessary technological operations. This scientific article examines a set of measures aimed at strengthening the technical equipment of the even-numbered railway station system and increasing the throughput and processing capacity of the Eastern Polygon of the railways.

### Keywords

Eastern railway polygon, technical equipment of the railway station, reduction of downtime, TEM14 shunting locomotive, heavy-weight trains, throughput and processing capacities

### For citation

Belogolov Yu.I., Malova M.V. Usilenie tekhnicheskogo osnashcheniya chetnoi sistemy zheleznodorozhnoi stantsii kak klyuchevoi faktor prirosta propusknykh i pererabatyvayushchikh moshchnostei Vostochnogo poligona [Strengthening the technical equipment of the even-numbered railway station system as a key factor in increasing the throughput and processing capacities of the Eastern polygon]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2025. No. 3 (87). Pp. 72–81. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).72-81.

### Article Info

Received: September 4, 2025; Revised: September 10, 2025; Accepted: September 11, 2025.

### Введение

В настоящее время на Восточном полигоне наблюдается планомерный прирост объемов железнодорожных грузовых перевозок, что приводит к увеличению размеров вагоно- и поездопотоков на всех ключевых магистральных линиях железнодорожной сети, а значит и к увеличению сортировочной работы. В среднем 60–70 % времени оборота вагона приходится на станции. Для снижения времени простоя вагонов, сокращения оборота, реализации возможностей по своевременной обработке возрастающего вагонопотока требуется скорейшая модернизация технической и технологической базы структурных подразделений Восточного полигона. Интенсификации должны быть подвергнуты прежде всего сортировочные станции, отвечающие за формирование поездопотоков и оказывающие непосредственное влияние на работу всей железнодорожной сети [1–3].

Многие станции выполняют функции не только по переработке транзитных вагонов, но и по погрузке и выгрузке грузов, посадке и высадке пассажиров, техническому обслуживанию транзитных поездов. В настоящее время все сортировочные станции ОАО «РЖД» оснащены сортировочными устройствами потребной мощности и комплектации, сортировочными парками, вытяжными путями и маневровыми средствами в соответствии с заданными объемами работы.

На Восточном полигоне железных дорог одной из самых крупных сортировочных стан-

ций является железнодорожная станция Иркутск-Сортировочный (И-С), что говорит о ее важном предназначении для обеспечения слаженной работы полигона в целом. По характеру выполняемых работ является внеклассной, укомплектована двумя сортировочными системами, т.е. является двухсторонней с последовательным расположением парков в обеих системах. В состав станции как опорной входит станция Б и расположенная на ней контейнерная площадка. По значимости проводимых работ станция является сетевой и находится непосредственно в узле, что требует регулярного усиления ее технического оснащения для обеспечения возможности пропуска прирастающего поездопотока на инфраструктурном комплексе Восточного полигона.

Учитывая изложенное, цель научной статьи заключается в разработке комплекса мероприятий, направленных на усиление технического оснащения четной системы железнодорожной станции И-С, прирост пропускных и перерабатывающих мощностей Восточного полигона железных дорог.

### Постановка задачи исследования совершенствования работы на станции

С целью совершенствования эксплуатационной работы на железнодорожной станции И-С стоит обратиться к статистической информации или к общему отчету по данным технических и технологических нарушений, что целесообразно

рассмотреть по хозяйствам [1–3]. В них начиная с 2022 г. прослеживается (поквартально) тенденция превышения допустимых норм рабочего парка вагонов, разрешенного к работе на станции. Данная статистика может свидетельствовать о недостаточной скорости обработки поступающих составов грузовых поездов, что негативно сказывается на показателях как самой станции, так и на работе всего полигона.

Согласно анализу технических нарушений на станции И-С за 2024 г., превышение рабочего парка над заданным планом составило:

- за октябрь – 3 652 вагона при установленных 2 973 (больше на 679 ед.);
- за ноябрь – 3 749 вагонов при установленных 2 729 (больше на 1 020 ед.);
- за декабрь – 3 838 вагонов при установленных 2 994 (больше на 844 ед.).

Для проведения анализа работы рассмотрены нормы производительности маневровых локомотивов рабочего парка. В табл. 1 приводятся сведения с указанием прироста показателя по отношению к предыдущему году.

**Таблица 1.** Динамика производительности маневрового локомотива рабочего парка по станции  
**Table 1.** Performance dynamics of the shunting locomotive of the working fleet at the station

Месяц Month	2023	2024	%
Январь January	167,8	175,99	104,8808105
Февраль February	166,19	169,35	101,9014381
Март March	167,7	168,99	100,7692308
Апрель April	193,78	167,3	86,33501909
Май May	172,6	165,9	96,11819235
Июнь June	175,2	169,01	96,46689498
Июль July	186,36	167,33	89,78858124
Август August	177,65	164,82	92,77793414
Сентябрь September	168,38	175,71	104,3532486
Октябрь October	160,76	189,25	117,7220702
Ноябрь November	169,94	181,11	106,5729081
Декабрь December	162,9	189,56	116,3658686
Общее Total	2069,26	2084,32	100,7277964

Из таблицы видно, что, несмотря на практически одинаковый объем выполненной работы, наблюдается прирост маневровой работы, к тому же по некоторым месяцам происходит его повышение почти на 20 %. Сохраняется тенденция превышения рабочего парка при незначительном росте маневровой работы.

Описанная проблема требует создания таких условий на ж.д. станции, при которых будет увеличено число отправляемых грузовых поездов своего формирования при сохранении текущего показателя маневровой работы.

Совершенствование сложившейся технологии работы [4] на станции может быть направлено на увеличение числа маневровых локомотивов и изменение технологии их работы либо модернизацию железнодорожной станции в целом. Модернизация станции является достаточно капиталоемким проектом, потому в дальнейшем рассматривать данное предложение в научном исследовании нецелесообразно. Следует также отметить, что железнодорожная станция на данный момент имеет производственные мощности, достаточные для обеспечения полной обработки входящего потока грузовых поездов. Что касается количества требуемых маневровых локомотивов и технологии работы, то и там, и там есть нюансы, тесно связанные между собой и требующие организационных решений [1].

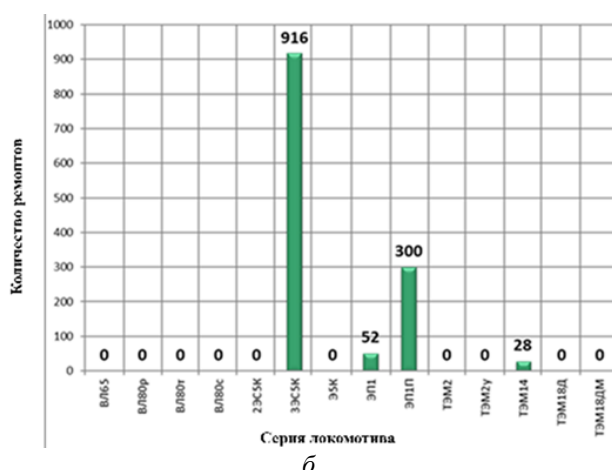
### Анализ состояния маневровых средств на железнодорожной станции

Потребное число локомотивов, согласно нормам на выполнение маневровой работы, для рассматриваемой станции составляет: 15 маневровых локомотивов, из них 12 тепловозов (ТЭМ14, ТЭМ18) и 3 электроваза (ВЛ65).

По техническо-распорядительному акту (ТРА) станции [5] маневровую работу в четной системе (парки О и Б) и нечетной системе (пара ЧС) выполняют 4 маневровых локомотива серии ТЭМ18, закрепленных за постом ЭЦ № 8. Один локомотив серии ТЭМ18 закреплен за операциями на тяжеловесной площадке поста ЭЦ № 16. В парке НПО и НС работу производят два локомотива серии ТЭМ18 (пост ЭЦ № 19). В парке М и ТП работает один локомотив серии ТЭМ18. На четной сортировочной горке, согласно ТРА, должны производить маневровые операции два локомотива серии ВЛ65 и один серии ТЭМ14. На нечетной сортировоч-

ной горке – два локомотива серии ТЭМ18, один серии ТЭМ14 и один ВЛ65. Именно такое количество маневровых локомотивов в локомотивном депо в соответствии с ТРА должно содержаться на балансе. Данный список не включает в себя локомотивы, обслуживающие подъездные пути общего и необщего пользования.

Для дальнейшего анализа стоит рассмотреть технологию обслуживания локомотивов, проанализировать технические сбои и других проблемы, которые могут оказать влияние на бесперебойную работу маневровых локомотивов. Для начала рассмотрим процесс производства внеплановых ремонтов локомотивов. Статистика внеплановых ремонтов по данным, полученным из ЛокоТех, представлена на рис. 1 и в табл. 2.



**Рис. 1.** Статистика внеплановых ремонтов с разбивкой по сериям локомотивов: а – за 11 месяцев 2024 г.; б – за 2023 г.

**Fig. 1.** Unscheduled repair statistics broken down by locomotive series: а – for 11 months of 2024; б – for 2023

По представленной статистике видно, что прослеживается завышенный простой локомотивов серии ТЭМ14 под внеплановым ремонтом, при условии, что их потребное количество на станции всего два. С целью выявления, какие именно серии машин чаще простаивают под ремонтом, стоит обратиться к статьям эксплуатационных расходов на обслуживание локомотивов серии ТЭМ14 и их дислокации. По данным табл. 3 к Восточно-Сибирской железной дороге приписаны шесть локомотивов серии ТЭМ14, из которых четыре находятся в состоянии внепланового ремонта или его ожидания. В рабочем состоянии находится всего два локомотива. Обратившись к статьям эксплуатационных расходов на содержание маневровых локомотивов по станции И-С, можно увидеть, что к станции приписан только один локомотив серии ТЭМ14 под инвентарным номером 108. Таким образом, на нечетной сортировочной горке станции на протяжении полутора лет работает только один локомотив серии ТЭМ14. В свою очередь в четной системе работает два локомотива серии ВЛ65. Отчеты по статьям эксплуатационных расходов содержат много позиций, поэтому данные в табл. 4 приведены обобщенные.

Маневровый локомотив серии ТЭМ14 является тяжеловесным и способен надвигать на сортировочную горку составы массой до 8 000 т в отличие от локомотивов серии ТЭМ18 или ВЛ65, работа которых может производиться только по технологии «сплоткой». Таким образом, при отсутствии в четной горловине станции локомотива серии ТЭМ14 для производства операций по надвику тяжеловесных составов задействуют оба локомотива серии ВЛ65. Также на станции периодически снимают с поста ЭЦ № 8 один маневровый локомотив ТЭМ18 для надвига легких составов, что является нарушением технологии работы. Фактически для полноценной работы станции нужно снимать два ТЭМ18 для возможности надвига двух тяжеловесных составов [5].

Применение такой технологии приводит к возникновению неграфиковых простоев прибывающих согласно графику движения поездов, составов в ожидании операций их обработки [6, 7]. С целью исключения неграфикового простоя грузовых поездов или его сокращения применяется съём с поста ЭЦ № 8 единицы маневрового локомотива серии ТЭМ18, кото-

Таблица 2. Простой локомотивов в внеплановом ремонте

Table 2. Locomotives downtime due to unscheduled repairs

Серия локомотива Locomonive series	2023		2024	
	Количество случаев Number of cases	Простой, час Downtime, hours	Количество случаев Number of cases	Простой, час Downtime, hours
ВЛ65	0	0	0	0
ВЛ80р	0	0	0	0
ВЛ80т	0	0	0	0
ВЛ80с	0	0	0	0
2ЭС5К	0	0	0	0
ЗЭС5К	916	25 525,03	756	20 267,41
ЭС5К	0	0	0	0
ЭП1	52	7 361,79	0	0
ЭП1П	300	50 839,21	285	82 007,53
ТЭМ2	0	0	0	0
ТЭМ2у	0	0	0	0
ТЭМ14	28	6 859,82	13	4 897,5833
ТЭМ18	0	0	0	0
ТЭМ18ДМ	0	0	0	0
ИТОГО	1 296	90 585,85	1 054	107 172,52

Таблица 3. Характеристика маневровых локомотивов

Table 3. Characteristics of shunting locomotives

Серия Series	Номер Number	Приписка Assignment	Дислокация Dislocation	Состояние Condition	Дата Date
ТЭМ7а	507	ТЧЭ-7 Улан-Удэ	Мегет	ГОЛ. ПОЕЗДА	17.02 07:15
ТЭМ14	112	ТЧЭ-5 Иркутск	СЛД-23 ЗИМИНСКОЕ	НЕПЛ. РЕМ	02.11.23 05:40
ТЭМ14	111	ТЧЭ-5 Иркутск	СЛД-15 ИРКУТСКОЕ	НЕПЛ. РЕМ	07.12.24 06:53
ТЭМ14	109	ТЧЭ-5 Иркутск	СЛД-23 ЗИМИНСКОЕ	ОЖ.НЕП.РЕМ	19.12.21 07:54
ТЭМ14	107	ТЧЭ-5 Иркутск	СЛД-15 ИРКУТСКОЕ	ОЖ.НЕП.РЕМ	14.02 13:22
ТЭМ7а	508	ТЧЭ-3 Зима	Ирк-Сорт	ПРОСТ. ПРИБ	16.02 06:02
ТЭМ7а	96	ТЧЭ-7 Улан-Удэ	Слюдянка II	СПЕЦМ.СТ.	17.02 03:34
ТЭМ7а	86	ТЧЭ-7 Улан-Удэ	Улан-Удэ	СПЕЦМ.СТ.	17.02 03:12
ТЭМ14	110	ТЧЭ-5 Иркутск	Перевоз	СПЕЦМ.СТ.	17.02 03:06
ТЭМ14	108	ТЧЭ-5 Иркутск	Ирк-Сорт	СПЕЦМ.СТ.	17.02 03:16

рый производит надвиг на сортировочную горку составов пониженного веса. Анализ технологического процесса работы четной системы железнодорожной станции показал, что для стабилизации ситуации применения дополнительной единицы маневрового локомотива недостаточно, фактически для полноценной работы станции необходимо применять маневровые локомотивы серии ТЭМ18 в количестве двух единиц, что обеспечит бесперебойный надвиг и легковесных и тяжеловесных составов [8–10].

Проведенный анализ показателей маневровой работы станции позволил выявить, что обработка составов с вагонами, имеющими отметку «запрещено спускать с горки» («ЗСГ»), маневровым локомотивом на сортировочной горке осуществляется ускоренно. Согласно ТРА,

сортировочная горка станции И-С не предназначена для заезда на него электровазозов, так как железнодорожные пути не оборудованы контактной сетью, вследствие чего единственный способ роспуска таких составов – это метод съема. Такой способ предполагает отцепку на путях надвига вагонов с отметкой «ЗСГ» одним локомотивом, при этом второй локомотив вагоны данной категории убирает, а после окончания роспуска расставляет по путям назначения, заезжая в четную систему парка ЧС. Таким образом, при обработке состава с вагонами с отметкой «ЗСГ» необходимо применять два локомотива, что ведет к увеличению технологического интервала и, как следствие, простою других составов, прибывающих согласно графику движения поездов в ожидании обработки. При

Таблица 4. Расходы на содержание маневровых локомотивов (частично)

Table 4. Costs of maintaining shunting locomotives (partially)

Номер локомотива Locomotive serial number	ТЭМ 14	ВЛ65				
	0108	0040	0031	0043	0048	0041
Январь January	0	0	0	1 055,94	76 396,3834	110 390,278
Февраль February	0	0	28 573,6803	0	0	30 398,7918
Март March	44 129,75	51 599,61	39 719,3363	56 493,7306	88 932,14	36 200,776
Апрель April	5 803	185,04	16 179,7203	11 650,8604	6 164,80432	50 494,08
Май May	5 803	0	26 926,046	10 448,8	11 118,8978	0
Июнь June	0	13 529,5549	24 047,93	1 409,43861	9 966,89612	0
Июль July	48 632,15	24 040,5267	24 795,8385	4 680,46062	12 385,2045	760,15973
Август August	95 414,72	1 185,96	26 474,7498	6 235,06463	4 066,94685	0
Сентябрь September	0	0	0	37 980,1114	24 550,0659	0
Октябрь October	11 606	0	22 657,4918	16 947,7448	22 857,207	10 902,9826
Ноябрь November	23 212	0	8 832,96056	15 086,796	24 597,9071	16 113,3262
Декабрь December	10 863,57	0	825,04533	2 406,56706	9 003,973	955,12393
За год Total	242 562,69	90 540,6916	256 962,517	167 802,583	290 040,426	285 997,756

наличии тепловоза обработку состава предпочтительнее вести методом осаживания.

### Предложение по восполнению тяговых мощностей станции

Первый и самый очевидный способ восполнения дефицита станции по маневровым локомотивам – это приобретение нового локомотива серии ТЭМ14, что является крайне нецелесообразным управленческим решением по причине его высокой стоимости. Согласно тендерным площадкам «Рос Тендер» и «BiCoTender», стоимость локомотива серии ТЭМ14 варьируется в диапазоне 110–150 млн руб.

Второй способ – замена локомотива на резервный, но, согласно данным табл. 3, все локомотивы задействованы в работе. Существует возможность запросить передачу локомотивов с других железных дорог, например с Дальневосточной железной дороги, где в резерве числится 30 ед. серии ТЭМ14.

Учитывая определенные технические сложности в передаче локомотива между железными дорогами в данном случае более реалистичным является первый способ. Причина

заключается в планомерном отказе от локомотивов серии ТЭМ14. Так, в дирекции тяги разрабатывается программа по постепенной замене серии ТЭМ14 на серию ТЭМ7а [11]. Такая тенденция выявлена по причине сложностей с производством ремонта локомотивов серии ТЭМ14, поскольку для таких локомотивов имеется дефицит подходящих запасных частей, из-за чего, как показано в табл. 4, локомотивы простаивают с 2021 г. в ожидании ремонта.

Неочевидный, но менее капиталоемкий способ заключается в восстановлении работоспособности локомотива серии ТЭМ14. Существует два пути: первый – капитальный ремонт локомотива. Для этого обратимся к табл. 5 с неисправностями локомотивов серии ТЭМ14. Согласно данным таблицы, такой вариант подходит только для четырех из шести локомотивов серии ТЭМ14, так как локомотив под № 110 находится в состоянии перевозки более одного года, а № 108 находится в работе. Для определения стоимости ремонта остальных локомотивов проанализируем рынок предложений по видам указанных работ.

Таблица 5. Неисправности локомотивов

Table 5. Locomotive malfunctions

Локомотив Locomotive	№	Место приписки Assignment	Заявляемая неисправность The declared defect
ТЭМ14	112	ТЧЭ-5 Иркутск	Иркутск. НР. Требуется смена дизель-генераторной установки – 2шт. 2 diesel generators need replacement
ТЭМ14	111	ТЧЭ-5 Иркутск	Неисправен компрессор, неисправна первая силовая установка The compressor is faulty, the first power unit is faulty
ТЭМ14	109	ТЧЭ-5 Иркутск	Иркутск. Ож. НР. Разоборудован. ТМЦ для восстановления в наличии. Отсутствие свободных ремонтных позиций. Irkutsk. Ozh. NP. Dismantled. Materials for restoration available. No available repair positions.
ТЭМ14	107	ТЧЭ-5 Иркутск	Ушла вода Water leaked dry
ТЭМ14	108	ТЧЭ-5 Иркутск	
ТЭМ14	110	ТЧЭ-5 Иркутск	

В локомотиве серии ТЭМ14 функционируют дизель-генераторные установки (ДГУ) типа ДГ880Л общей мощностью 2 400 л.с. В локомотиве установлен агрегат компрессорный винтовой 5,25/1П У2, производительность которого не менее 5,25 м<sup>3</sup>/мин.

Согласно тендерным площадкам, покупка указанного двигателя обойдется примерно в 30 млн руб., при этом единственным поставщиком таких двигателей на рынок является Уральский дизель-моторный завод.

Капитальный ремонт, согласно информации, полученной от менеджеров компаний «Нева-дизель» [12] (занимается обслуживанием железнодорожного, судового и промышленного оборудования) и «ПП Дизельмаш» [13] (обслуживающая железнодорожное оборудование и локомотивы серии ТГМ и ТЭМ), закупающие запчасти у таких производителей, как «Пенза-дизельмаш» и «Люденовотепловоз», последний из которых и является производителем ТЭМ14, капитальный ремонт двигателя обойдется в 18–19 млн руб. Незначительно большая цена выставлена на тендерных площадках.

Данных по капитальному ремонту ДГУ у указанных компаний нет, однако на тендерных площадках выставлена сумма за такой ремонт – 5,3 млн руб. Стоимость покупки новой силовой установки также не определена, однако, согласно информации, полученной от менеджеров указанных компаний, составит примерно столько же, что и покупка нового двигателя.

Данных по приобретению или ремонту компрессоров ни у фирм, ни на тендерных площадках найдено не было, однако цены на схожие по производительности модели на разных торговых платформах и по данным Челя-

бинского компрессорного завода варьируется от 150 до 350 тыс. руб. Капитальный ремонт обойдется в сумму от 50 до 110 тыс. руб.

Еще одной технической неисправностью локомотивов данной серии является «уход воды» из системы охлаждения двигателя. Причин «ухода в оды» достаточно много, поэтому ремонт может оказаться небольшим (например, замена резиновых прокладок и запчастей), а может потребоваться и капитальный ремонт, т.е. разбег по сумме составляет от 40 тыс. руб. (цена ремкомплекта на двигатель) до 7 млн. руб.

Проведя анализ причин неисправности локомотивов серии ТЭМ14, можно определить ориентировочную стоимость ремонта для каждого из них. Примерные цены на ремонт локомотивов представлены в табл. 6.

Проблема ремонта локомотивов серии ТЭМ14, как указывалось ранее, связана с отсутствием запасных частей, вследствие чего детали приходится закупать в отдаленных регионах или изготавливать на заказ. Длительность поставки запчастей для локомотива серии ТЭМ14 может длиться до полугода, не говоря уже о закупке нового двигателя. Приобретение и установка ДГУ по сложности схожа с ремонтом (приобретением) двигателя. С покупкой и поставками АКВ ситуация несколько проще вследствие того, что агрегат намного легче в производстве, чем двигатель или ДГУ, к тому же он получил большее распространение, так как используется на других маневровых локомотивах.

Капитальный ремонт, согласно данным «ПП Дизельмаш», по времени занимает от 20 до 30 дней для двигателя и ДГУ и до 40 дней уйдет на капитальный ремонт локомотива.

**Таблица 6.** Примерная стоимость ремонта локомотивов  
**Table 6.** Approximate cost of locomotive repairs

Номер ТЭМ14 Number	Стоимость ремонта при наихудшем варианте Worst-case scenario repair cost	Стоимость ремонта при наилучшем варианте Best-case scenario repair cost
112	40 млн руб. (закупка двух новых ДГУ) 40 million rubles (purchase of two new diesel generator sets)	10,6 млн руб. (капитальный ремонт обоих ДГУ) (major repairs of both diesel generator sets)
111	20,350 млн руб. (закупка новых АКВ и ДГУ) (purchase of new AKV and diesel generator sets)	5,410 млн руб. (капитальный ремонт ДГУ и АКВ) (major repairs of diesel generator sets and air AKV)
109	19 млн руб. (только капитальный ремонт локомотива) (locomotive overhaul only)	—
107	40 тыс. руб. (рем. комплект) (repair kit)	7 млн руб. (капитальный ремонт двигателя) (engine overhaul)

Второй способ – собрать из двух локомотивов один рабочий. Например, в сервисном локомотивном депо 23 – Зиминское отстаивают два локомотива – № 112 и 109. Первый полностью разоборудован, а у второго требуется замена обоих ДГУ. Существует возможность использования исправного ДГУ со 112-го и установки на 109. Ввиду планомерного отказа от старых ТЭМ14 такой способ является наиболее оптимальным.

Указанный подход позволит восполнить дефицит внутренних мощностей для сортировочной станции с минимальными финансовыми и временными затратами [14–16]. Поскольку нет данных о проведении подобных мероприятий, определить точную стоимость работ представляется сложной задачей. В настоящее время стоимость проведения ТО-3, согласно данным «ПП Дизельмаш», составляет 10–12,5 млн руб., которую можно принять за основу для предлагаемого мероприятия.

Восстановление локомотива серии ТЭМ14 позволит ускорить процесс расформирования и, как следствие, сократить накопление вагонов в парке ЧС. Кроме того, мероприятие позволит снизить высокую загруженность

остальных локомотивов и нивелировать опасность неприятия на станцию состава при поломке одного из них [17, 18].

### Заключение

Среди аспектов [19] рассматриваемой проблемы в работе сортировочной горки выявлены «узкие места» – завышенное время обработки поездов повышенного веса и грузовых поездов с вагонами с отметкой «ЗСГ».

Рассмотрено мероприятие по внедрению локомотива серии ТЭМ14 на сортировочной горке станции. С этой целью проведено комплексное исследование технологии работы маневровых тепловозов с тяжеловесными поездами и поездами с вагонами с отметкой «ЗСГ».

Проведенные исследования [20] подтвердили предположение о необходимости восстановления локомотива серии ТЭМ14. Предлагаемое техническое решение позволит оптимизировать работу станции и, в частности, маневрового локомотива, уменьшить простой транзитного вагона с переработкой, а также приведет к сокращению простоя местных вагонов.

### Список литературы

1. Оленцевич В.А., Власова Н.В. Вопросы моделирования работы локомотивного комплекса с целью обоснования возможности освоения перспективных грузопотоков на восточном направлении страны // Постсоветский материк. 2025. № 3 (47). С. 70–84.
2. Буяннэмэх А., Оленцевич В.А., Каимов Е.В. Вопросы применения интеллектуальной системы управления и организации маневровой работы на инфраструктурном комплексе Улан-Баторской железной дороги // Известия Транссиба. 2024. № 4 (60). С. 63–78.



3. Оленевич В.А., Каимов Е.В. Необходимость усиления перевозочного потенциала железнодорожной станции Байкало-Амурской магистрали в целях готовности инфраструктурного комплекса к плановым грузопотокам // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2023. № 4 (92). С. 91–100.
4. Технологический процесс работы сортировочной станции Иркутск – Сортировочный Восточно – Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» : утв. В.Н. Тимофеев. Иркутск : ВСЖД, 2025. 160 с.
5. Техническо – распорядительный акт железнодорожной станции И–С Восточно – Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» : утв. Е.А. Алфимов. Иркутск : ВСЖД, 2025. 186 с.
6. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н. К вопросу о нормировании продолжительности маневров по осаживанию вагонов // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта : межвуз. сб. науч. тр. М., 2025. С. 526–537.
7. Иванков А.Н., Четчуев М.В. О Проблемах учета перспективы развития железнодорожных станций и узлов // Образование – Наука – Производство : материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Чита, 2024. Т. 1. С. 419–427.
8. Буракова А.В., Иванкова Л.Н., Иванков А.Н. Определение продолжительности расформирования составов при различных вариантах технического оснащения грузовых станций // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2020. С. 156–159.
9. Рыбин П.К., Ермакова А.В. Влияние маневрового обслуживания путей необщего пользования на потребный резерв пропускной и перерабатывающей способности станции // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 6 (72). С. 70–77.
10. Тепикин В.А., Котенко А.Г., Ролле И.А. Совершенствование способов расформирования составов с вагонами, запряженными к роспуску // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2018. Т. 15. № 1. С. 90–99.
11. Ким С.И., Пронин А.А., Елисеев С.В. Контроль неисправности тепловоза ТЭМ7А перед началом работы в режиме «Автомашинист» // Локомотив. 2023. № 2 (794). С. 5–6.
12. НЕВА дизель. Судовое, железнодорожное и промышленное оборудование, запчасти : сайт. URL : <https://neva-diesel.com> (Дата обращения 28.08.2025)
13. Дизельмаш: поставка запасных частей и ремонт тепловозов : сайт. URL : <https://dizelmashmsk.com/o-kompanii#> (Дата обращения 27.08.2025).
14. Тренды рынка подвижного состава : альманах // ROLLINGSTOCK Agency : сайт. URL : [https://rollingstockworld.ru/wp-content/uploads/2023/10/rollingstock\\_almanac\\_2023\\_rus.pdf](https://rollingstockworld.ru/wp-content/uploads/2023/10/rollingstock_almanac_2023_rus.pdf) (Дата обращения 26.08.2025).
15. Гренкевич О.О. Выбор эффективного способа сортировки местных вагонов по критерию эксплуатационных расходов // ВУЗы Сибири и Дальнего Востока – Транссибу : материалы регионал. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2002. С. 69–75.
16. Таюрская А.К., Асташков Н.П. Повышение энергоэффективности тепловозов // Соискатель – приложение к журналу «Мир транспорта». 2023. № 3 (14). С. 110–113.
17. Оленевич А.А., Асташков Н.П. Комплексная механизация интенсификации переработки вагонов на сортировочных горках // Наука сегодня: проблемы и пути решения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Вологда, 2020. С. 12–13.
18. Юменчук А.А., Крамынина Г.Н., Асташков Н.П. Повышение энергетических показателей при маневровой работе // Молодая наука Сибири : электрон. журн. 2018. № 2 (2). С. 33–37. URL: [https://www.irgups.ru/jirbis2/components/com\\_irbis/pdf\\_view/?712891](https://www.irgups.ru/jirbis2/components/com_irbis/pdf_view/?712891) (Дата обращения 26.09.2025).
19. Белоголов Ю.И., Гозбенко В.Е. Моделирование поездопотоков на участке Усть-Илимск – Хребтовая с целью увеличения пропускной способности // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 4 (63). С. 28–35.
20. Гозбенко В.Е., Громышова С.С., Белоголов Ю.И. Исследование входящего поездопотока на сортировочную станцию методом интервального прогнозирования // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития : сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары, 2019. С. 155–159.

## References

1. Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Voprosy modelirovaniya raboty lokomotivnogo kompleksa s tsel'yu obosnovaniya vozmozhnosti osvoeniya perspektivnykh gruzopotov na vostochnom napravlenii strany [Issues of modeling the operation of a locomotive complex in order to substantiate the possibility of developing promising cargo flows in the eastern direction of the country]. *Postsovetiskii materik* [Post-soviet continent]. 2025, no 3 (47), pp. 70–84.
2. Buyannemekh A., Olentsevich V.A., Kaimov E.V. Voprosy primeneniya intellektual'noi sistemy upravleniya i organizatsii manevrovoy raboty na infrastrukturном комплексе Улан-Баторской железной дороги [Issues of using an intelligent control system and organizing shunting work on the infrastructure complex of the Ulaanbaatar Railway]. *Izvestia Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2024, no 4 (60), pp. 63–78.
3. Olentsevich V.A., Kaimov E.V. Neobkhodimost' usileniya perevozchnogo potentsiala zheleznodorozhnoi stantsii Baikalo-Amurskoi magistrali v tselyakh gotovnosti infrastrukturnogo kompleksa k planovym gruzopotokam [The need to strengthen the transportation potential of the railway station of the Baikal-Amur Mainline in order to prepare the infrastructure complex for planned freight flows]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2023, no 4 (92), pp. 91–100.
4. Tekhnologicheskii protsess raboty sortirovochnoi stantsii Irkutsk–Sortirovochnyy Vostochno – Sibirskoi zheleznoidorogi – filiala ОАО «RZHD» [Technological process of operation of the sorting station Irkutsk - Sortirovochnyy of the East Siberian Railway – a branch of JSC «Russian Railways»]. Irkutsk: VSZhD Publ., 2025. 160 p.
5. Tekhnicheskoe-rasporyaditel'nyi akt zheleznodorozhnoi stantsii I–S Vostochno-Sibirskoi zheleznoidorogi – filiala ОАО «RZHD» [Technical and administrative act of the railway station I-S of the East Siberian Railway – a branch of JSC «Russian Railways»]. Irkutsk: VSZhD Publ., 2025. 186 p.
6. Ivankova L.N., Ivankov A.N. K voprosu o normirovani prodolzhitel'nosti manevrov po osazhivaniyu vagonov [On the issue of regulating the duration of maneuvers for unloading wagons]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Sovremennye*

problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta» [Interuniversity proceedings «Modern problems of improving the operation of railway transport». Moscow, 2025, pp. 526–537.

7. Ivankov A.N., Chetchuev M.V. O problemakh ucheta perspektivy razvitiya zheleznodorozhnykh stantsii i uzlov [About the problems of taking into account the prospects for the development of railway stations and junctions]. *Materialy VIII Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the VIII All-Russian (with international participation) scientific and practical conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2024, Vol. 1, pp. 419–427.

8. Burakova A.V., Ivankova L.N., Ivankov A.N. Opredelenie prodolzhitel'nosti rasformirovaniya sostavov pri razlichnykh variantakh tekhnicheskogo osnashcheniya gruzovykh stantsii [Determination of the duration of disbandment of trains for various options for technical equipment of freight stations]. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya transporta, promyshlennosti i ekonomiki Rossii (TransPromEk 2020)»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Current problems and prospects for the development of transport, industry and the economy of Russia (TransPromEk 2020)»]. Voronezh, 2020, pp. 156–159.

9. Rybin P.K., Ermakova A.V. Vliyaniye manevrovogo obsluzhivaniya putei neobshchego pol'zovaniya na potrebnyy rezerv propusknoi i pererabatyvayushchei sposobnosti stantsii [The influence of shunting maintenance of non-public tracks on the required reserve of throughput and processing capacity of the station]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region], 2018, no 6 (72), pp. 70–77.

10. Tepikin V.A., Kotenko A.G., Rolle I.A. Sovershenstvovanie sposobov rasformirovaniya sostavov s vagonami, zapreshchennymi k rospusku [Improving methods for disbanding trains with wagons prohibited from disbanding]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Saint Petersburg State Transport University], 2018, Vol. 15, no 1, pp. 90–99.

11. Kim S.I., Pronin A.A., Eliseev S.V. Kontrol' neispravnosti teplovoza TEM7A pered nachalom raboty v rezhime «Avto-mashinist» [Monitoring the malfunction of the TEM7A diesel locomotive before starting work in the «Driver» mode]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2023, no 2 (794), pp. 5–6.

12. NEVA dizel'. Sudovoe, zheleznodorozhnoe i promyshlennoe oborudovanie, zapchasti (Elektronnyi resurs) [NEVA diesel. Marine, railway and industrial equipment, spare parts (Electronic resource)]. Available at: <https://neva-diesel.com> (Accessed August 28, 2025).

13. PP Dizel'mash. Remont teplovozov, podvizhnogo sostava (Elektronnyi resurs) [PP Dieselmash. Repair of diesel locomotives and rolling stock]. Available at: <https://dizelmashmsk.com/o-kompanii#> (Accessed August 27, 2025).

14. Trendy rynka podvizhnogo sostava (Elektronnyi resurs) [Rolling stock market trends (Electronic resource)]. Available at: [https://rollingstockworld.ru/wp-content/uploads/2023/10/rollingstock\\_almanac\\_2023\\_rus.pdf](https://rollingstockworld.ru/wp-content/uploads/2023/10/rollingstock_almanac_2023_rus.pdf) (Accessed August 26, 2025).

15. Grenkevich O.O. Vybory effektivnogo sposoba sortirovki mestnykh vagonov po kriteriyu ekspluatatsionnykh raskhodov [Selection of an effective method for sorting local wagons according to the criterion of operating costs]. *Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «VUZy Sibiri i Dal'nego Vostoka – Transsibu»* [Proceedings of the regional scientific and practical conference «Universities of Siberia and the Far East for Transsib»]. Novosibirsk, 2002, pp. 69–75.

16. Tayurskaya A.K., Astashkov N.P. Povysheniye energoeffektivnosti teplovozov [Increasing the energy efficiency of diesel locomotives]. *Soiskatel' – prilozheniye k zhurnalu «Mir transporta»* [Applicant – supplement to the journal «World of Transport»], 2023, no 3 (14), pp. 110–113.

17. Olentsevich A.A., Astashkov N.P. Kompleksnaya mekhanizatsiya intensivifikatsii pererabotki vagonov na sortirovochnykh gorkakh [Integrated mechanization of intensified processing of wagons at hump yards]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka segodnya: problemy i puti resheniya»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Science today: problems and solutions»]. Vologda, 2020, pp. 12–13.

18. Yumenchuk A.A., Kramynina G.N., Astashkov N.P. Povysheniye energeticheskikh pokazatelei pri manevrovoi rabote [Increasing energy performance during shunting work]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2018, no 2 (2), pp. 33–37.

19. Belogolov Yu.I., Gozbenko V.E. Modelirovaniye poezdopotov na uchastke Ust'-Ilimsk – Khrebtovaya s tsel'yu uvelicheniya propusknoi sposobnosti [Modeling of train flows on the Ust'-Ilimsk – Khrebtovaya section in order to increase capacity]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2022, no 4 (63), pp. 28–35.

20. Gozbenko V.E., Gromyshova S.S., Belogolov Yu.I. Issledovaniye vkhodyashchego poyezdopotoka na sortirovochnuyu stantsiyu metodom interval'nogo prognozirovaniya [Research of incoming train flow to a marshalling yard using the interval forecasting method]. *Sbornik materialov XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka, obrazovanie, obshchestvo: tendentsii i perspektivy razvitiya»* [Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference «Science, education, society: trends and development prospects»]. Cheboksary, 2019, pp. 155–159.

### Информация об авторах

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

**Малова Марина Васильевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления качеством и инженерной графики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: malova\_mv@irgups.ru.

### Authors

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

**Marina V. Malova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Quality Management and Engineering Graphics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: malova\_mv@irgups.ru.

## Исследование действующей технологии разработки и корректировки планов формирования поездов на железных дорогах Монголии

В.А. Оленцевич✉

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

✉olencevich\_va@mail.ru

### Резюме

В последние годы железнодорожная политика Монголии представляет собой не просто транспортную стратегию, а комплексный инструмент диверсификации экономики и обеспечения ее устойчивого роста. На 30 % выросли объемы погрузки и выгрузки по железнодорожным станциям Улан-Баторской железной дороги, при этом возрастает простой местных вагонов, увеличивается оборот вагона, вследствие чего растет потребность в рабочем парке вагонов. Данные факторы вызывают необходимость перехода от традиционных способов управления движением поездов к интегрированным, которые позволят беспрепятственно реализовать перспективные параметры пропускных и провозных мощностей сети железных дорог Монголии. Основой деятельности дороги является работа с местными вагонами, которые формируются в участковые, вывозные и сборные поезда. Общее число назначений этих поездов равно 41. Проанализирован действующий план составления поездов, в котором предусмотрено 26 четных и 22 нечетных назначения, суммарное число подбрасываемых в них групп вагонов составило 100. Формированием занимаются 12 железнодорожных станций. С учетом большого числа маломощных назначений вагоны длительное время простаивают под накоплением, что увеличивает общий простой местного вагона. Автором статьи разработаны и представлены предложения по изменению действующего плана формирования поездов с целью сокращения количества назначений и уменьшения числа групп, входящих в них. Дана экономическая оценка предлагаемого варианта оптимизационного решения.

### Ключевые слова

железнодорожный транспорт Монголии, пропускные и провозные мощности сети, план формирования поездов, показатели эксплуатационной работы, мощность вагонопотоков, единый технологический процесс, простой вагонов под накоплением, формирование поездов, простой местного вагона, ступенчатый график вагонопотоков, экономический эффект

### Для цитирования

Оленцевич В.А. Исследование действующей технологии разработки и корректировки планов формирования поездов на железных дорогах Монголии / В.А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 82–92. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).82-92.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 08.09.2025 г.; поступила после рецензирования: 15.09.2025 г.; принята к публикации: 16.09.2025 г.

## Research on the current technology of developing and adjusting train formation plans on the Mongolian railways

V.A. Olentsevich✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉olencevich\_va@mail.ru

### Abstract

In recent years, Mongolia's railway policy has evolved from a simple transportation strategy to a comprehensive tool for diversifying the economy and promoting sustainable growth. There has been a 30% increase in the volume of loading and unloading at the railway stations of the Ulaanbaatar Railway, leading to an increase in the idle time of local railwagons and a decrease in the turnover of railwagons, resulting in a higher demand for railwagons. These factors have necessitated a shift from traditional train management methods to integrated approaches that allow to effectively utilize the prospective parameters of the throughput and carrying capacity of the Mongolian railway network. The basis of the road's activities is the work with local wagons, which are formed into sectional, export, and combined trains – the total number of these train assignments is 41. The current train formation plan has been analyzed, which provides for 26 even and 22 odd train assignments, with a total of 100 groups of wagons selected. The formation is carried out by 12 railway stations. Considering the large number of low-capacity train assignments, wagons are idle for a long time, which increases the overall idle time of the local wagon. Proposals have been developed and presented to change the current formation plan in order to reduce the number of assignments and the number of groups included in them. An economic assessment of the proposed optimization solution has been provided.

**Keywords**

Mongolia's railway transport, network capacity and throughput, train formation plan, operational performance indicators, wagon flow capacity, unified technological process, accumulated wagon downtime, train formation, local wagon downtime, step-by-step wagon flow schedule, economic benefits

**For citation**

Olentsevich V.A. Issledovanie deistvuyushchei tekhnologii razrabotki i korrektyrovki planov formirovaniya poezdov na zheleznykh dorogakh Mongolii [Research on the current technology of developing and adjusting train formation plans on the Mongolian railways]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. № 3(87). Pp. 82–92. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).82-92.

**Article Info**

Received: September 8, 2025; Revised: September 15, 2025; Accepted: September 16, 2025.

**Введение**

Железнодорожный транспорт Монголии всегда играл ключевую роль в успешном развитии экономики страны, обеспечивая экспорт сырьевых ресурсов и транзитные перевозки между Россией и Китаем. В последние годы в условиях значительного прироста грузопотоков и появления двух крупных маршрутов (Таван-Толгой – Гашуунсухайт и Зүүнбаян – Ханги) возникает необходимость перехода от традиционных способов управления движением поездов к интегрированным, которые позволяют беспрепятственно реализовать перспективные параметры пропускных и провозных мощностей основной сети железных дорог Монголии в плотном взаимодействии с прилегающими участками и железными дорогами [1, 2].

В последние годы происходит укрепление существующих и создание новых транспортных коридоров, что создает оптимальные возможности для выхода минеральной продукции не только на рынок Китая и России, а также в страны Азиатско-Тихоокеанского региона. В этом контексте железнодорожная сеть становится ключевым элементом интеграции Монголии в международную логистическую систему и фактором снижения внешнеэкономических рисков [1–3].

Изложенные принципы легли в основу научного исследования действующей технологии разработки и корректировки планов формирования поездов на железных дорогах Монголии, которые сегодня выступают не как единая транспортная артерия страны, а разрозненные, функционирующие на собственных принципах и не имеющие унифицированных технологических процессов структурные подразделения.

Целью научной статьи является комплексный анализ и разработка предложений по оптимизации плана формирования поездов на

примере Улан-Баторской железной дороги (УБЖД) с экономической оценкой предлагаемого варианта оптимизационного решения.

**Вопросы формирования новой экономической структуры Монголии**

Провозная способность Трансмонгольской железной дороги составляет 30 млн т в год. Сеть включает 75 железнодорожных станций, из которых 10 являются ключевыми узлами, 44 оборудованы средствами сигнализации и связи [3–5].

В целях увеличения объемов перевозок полезных ископаемых и реализации планов по активному развитию туризма правительство Монголии реализует масштабную программу модернизации железных дорог: электрификация инфраструктурного комплекса, строительство вторых главных путей, замена морально и физически устаревшего тягового подвижного состава, обновление систем сигнализации и связи, усиление верхнего строения пути за счет повсеместного использования железобетонных шпал и пр. [5–7].

На рис. 1 представлен план инфраструктурного комплекса железных дорог Монголии [6].

Сегодня крупные проекты по развитию инфраструктурного комплекса железных дорог Монголии реализуются в рамках создания новой экономической структуры страны, что включено в долгосрочную политику развития Монголии «Видение 2050» и государственную «Новую политику возрождения» [3, 4, 8].

В соответствии с новой политикой развития страны в южных регионах ведется строительство трех новых железнодорожных линий:

1. Тавантолгой – Зуунбаян – однопутная ширококолейная, неэлектрифицированная линия протяженностью 416 км позволит соеди-



Рис. 1. Новый инфраструктурный комплекс железных дорог Монголии

Fig. 1. New infrastructure complex of Mongolian railways

нить угольное месторождение Цогтцэций с линией в Зуунбаян. В перспективе обеспечит выход через Чойбалсан на железные дороги России и Китая.

2. Тавантолгой – Гашуунсухайт протяженностью 248 км позволит производить транспортировку коксующегося угля на экспорт в промышленно развитые регионы Северного Китая и через морские порты (Хуанхуа, Тяньцзинь, Циндао, Цзиньчжоу) на третьи рынки. Заявленная проектная провозная способность – более 40 млн т грузов в год.

3. Зүүнбаян – Ханги – ширококолейная линия протяженностью 227 км. Цель сооружения – сократить объемы перегрузки грузов по железнодорожной станции Замын-Ууд и обеспечить возможность пропуска перспективных объемов экспорта железной руды и угля в Китай. После полного ввода в эксплуатацию данной линии протяженность маршрута от станции Ероо до китайской железнодорожной станции Бугат сократится на 318 км (до 1 722 км), что позволит существенно снизить транспортные издержки (на 4–8 долл. США за 1 т) и повысить конкурентоспособность монгольской руды на китайском рынке в сравнении с сырьем из Австралии [3–10].

Государственная политика Монголии в области железнодорожного транспорта реализуется в тесной связи с разработкой стратегических месторождений полезных ископаемых и

их экспортом на третьи рынки. Основопологающим документом, определяющим проектные решения в области развития, модернизации и наращивания мощностей инфраструктурного комплекса железнодорожных дорог, выступает «Государственная политика в области железнодорожного транспорта», где предусмотрено поэтапное строительство новой сети, диверсификация транспортных коридоров в направлении Китая и России, а также формирование вдоль транспортных магистралей промышленных кластеров для выпуска продукции с добавленной стоимостью [3, 5, 10].

Самой значимой линией УБЖД является магистраль  $T - C1 - U - 3$ , общая протяженность которой составляет 1 111 км. Оперативное руководство осуществляется четырьмя диспетчерскими участками с командного пункта в городе У.

В среднем в сутки прием со стороны Российской Федерации составляет 251 вагон, из этого числа 142 вагона составляют транзит. Прием со стороны Китайской Народной Республики – 152 вагона, из них 64 вагона приходится на транзит. Экспорт в Россию – 194 вагона, в Китай – 370.

Максимальное количество местных вагонопотоков между станциями У и Б составляет: в четном направлении 229, в нечетном – 416. Местные вагонопотоки составляют значительную часть от общего объема работы УБЖД.

Доля перевозок УБЖД неуклонно росла с 2021 по 2024 г. В 2025 г. Монголия превысила возможности прошлого года по перевозке на 28,1 млн т грузов. В 2024 г. УБЖД расширила свой подвижной состав и приобрела восемь новых поездных локомотивов, произведенных на Брянском локомотивном заводе в России [4, 7, 11].

Существенным недостатком, препятствующему дальнейшему успешному развитию железных дорог Монголии, является их разрозненность и разобщенность при организации движения поездов и эксплуатации инфраструктурного комплекса. Отсутствие единой системы организации технологических процессов приводит к низкому уровню показателей эксплуатационной работы, снижает качество использования подвижного состава, делает монгольские железные дороги неконкурентоспособными на транспортном рынке.

### Анализ существующего плана формирования поездов Улан-Баторской железной дороги

Согласно действующему плану формирования поездов, в 2025 г. в четном направлении всего 26 назначений, из них 4 сквозных, 6 участковых, 3 сборных, 6 передаточных и 7 вывозных, т. е. доля назначений местных поездов составляет 91 %. Общее число групп в формируемых назначениях – 43. В составлении четных поездов задействованы 10 железнодорожных станций УБЖД.

В нечетном направлении всего 22 назначения, из них 3 сквозных, 6 участковых, 3 сборных, 5 передаточных и 5 вывозных. Доля назначений местных поездов – 86 %. Общее число групп в формируемых назначениях – 57. В составлении нечетных поездов задействованы 12 железнодорожных станций УБЖД [2–10].

На основе данных таблиц плана формирования поездов по четному и нечетному направлениям [6, 7] разработано графическое отображение действующего плана формирования поездов (рис. 2).

В настоящее время на УБЖД действует план формирования поездов, в котором предусмотрено 26 четных и 22 нечетных назначения. Общее число подбираемых в них групп вагонов – 100. Основой деятельности УБЖД является работа с местными вагонами, которые формируются в участковые, вывозные и сборные поезда – общее число назначений таких поездов – 41. Формированием занимаются 12 железнодорожных станций УБЖД. С учетом большого числа маломощных назначений вагоны длительное время простаивают под накоплением, что увеличивает общий простой местного вагона.

Для анализа действующего плана формирования и разработки вариантов корректировки по отчетным данным установлены размеры струй вагонопотоков, образующихся на каждой станции формирования поездов в адрес других станций. Эти струи представлены

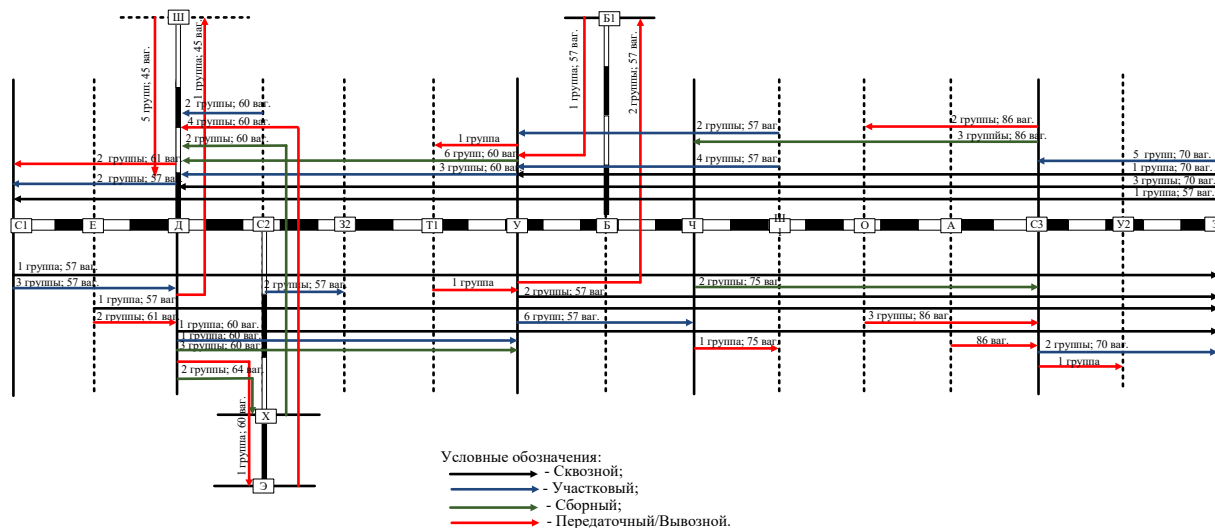


Рис. 2. Действующий план формирования поездов  
Fig. 2. The current train formation plan

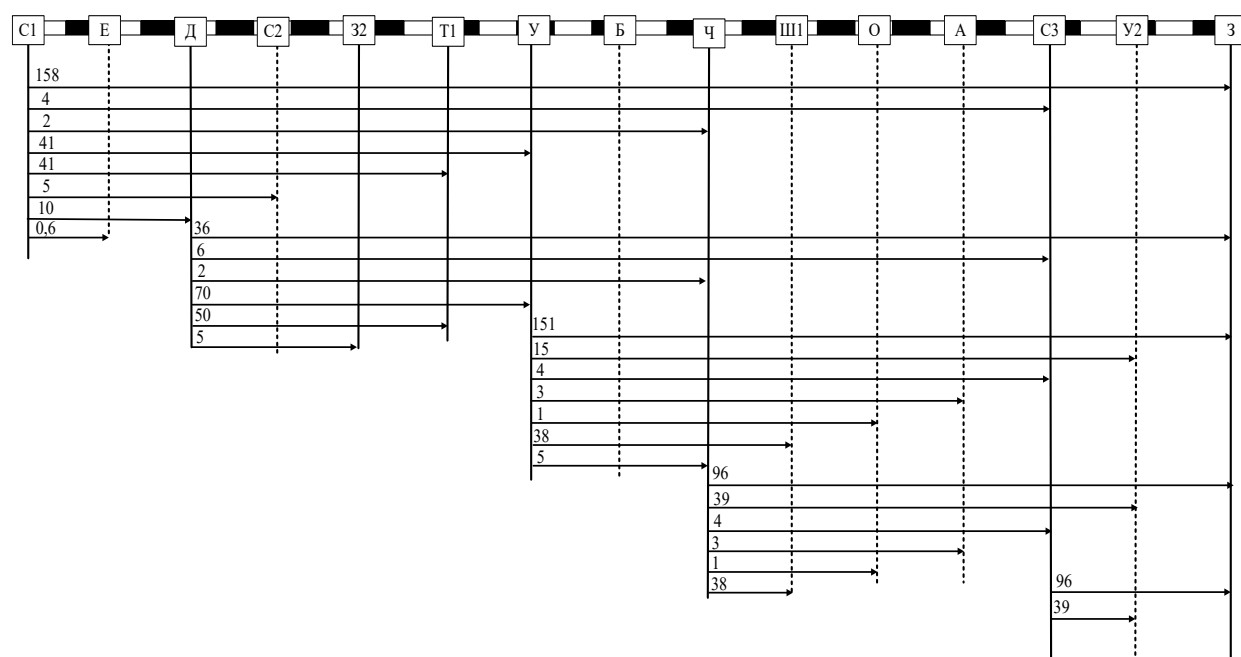
в виде ступенчатых графиков вагонопотоков в четном и нечетном направлениях (рис. 3, а, б). Станциями формирования местных поездов являются следующие станции: С1, Е, Д, С2, У, Ч, О, А, С3, 3.

Очевидно, что особенностью работы УБЖД является большое число струй вагонопотоков, мощность которых невелика. Поэтому применить рекомендации инструктивных указаний [12] не представляется возможным.

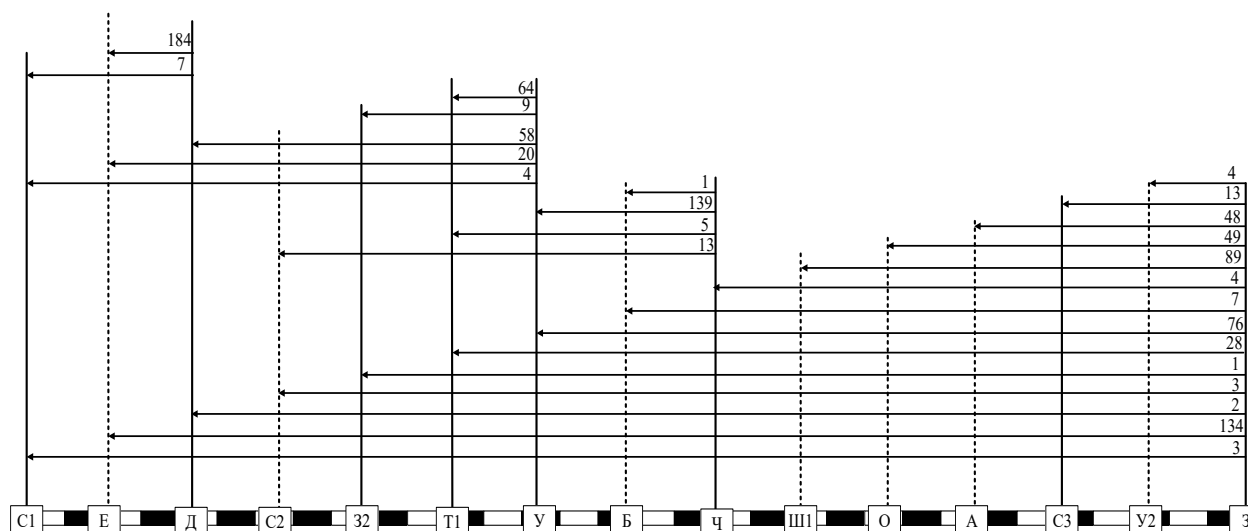
### Предложения по изменению плана формирования поездов для железнодорожных станций Улан-Баторской железной дороги

При разработке предложений по изменению плана формирования поездов для станций УБЖД ставилась задача – по возможности сократить число формируемых назначений и уменьшить число входящих в них групп [13–19].

Предлагаемый план формирования по направлениям движения приведен в табл.



а



б

Рис. 3. Ступенчатый график вагонопотоков в четном (а) и нечетном (б) направлениях  
Fig. 3. Stepped schedule of wagon flows in even (a) and odd (b) direction

Предлагаемый план формирования по направлениям  
Proposed plan for formation by directions

Станция назначения грузового поезда Destination station of a freight train	Классификация поезда Train classification	Мощность вагонопотока, вагонов в сутки Wagon flow capacity, wagons per day	Количество поездов в сутки Number of trains per day	Количество групп в поезде Number of groups on the train	Станция назначения вагонов Destination station of wagons
<i>В четном направлении In the even direction</i>					
План формирования по станции <i>С1</i> Formation plan for station <i>С1</i>					
<i>З</i>	Сквозной Through	158,42	2,56	Одногруппный Single-group	<i>З</i>
<i>Д</i>	Участковый Sectional	102,04	1,46	Двухгруппный Two-group	<i>Д</i> <i>Т1</i>
План формирования по станции <i>Е</i> Formation plan for station <i>Е</i>					
<i>Д</i>	Участковый Sectional	184,68	3,08	Двухгруппный Two-group	<i>З</i> <i>Д</i>
План формирования по станции <i>Д</i> Formation plan for station <i>Д</i>					
<i>У</i>	Участковый-сборный Sectional-prefabricated	136,74	2,28	Трехгруппный Three-group	<i>У</i> <i>А1</i> <i>32</i>
<i>Э</i>	Участковый Sectional	33,3	1,51	Одногруппный Single-group	<i>Э</i>
<i>Х</i>	Передаточный Transfer	45,25	2,06	Двухгруппный Two-group	<i>Х</i> <i>С2</i>
План формирования по станции <i>У</i> Formation plan for station <i>У</i>					
<i>З</i>	Сквозной Through	151,11	2,16	Четырехгруппный Four-group	<i>З</i>
<i>Б</i>	Передаточный Transfer	111,09	1,85	Одногруппный Single-group	<i>Б</i>
<i>Ч</i>	Сборный Prefabricated	67,19	1,12	Многогруппный Multi-group	<i>С3 – А – О – Ш1 – Ч – Б</i>
План формирования по станции <i>Ч</i> Formation plan for station <i>Ч</i>					
<i>С3</i>	Сборный Prefabricated	65,68	0,94	Шестигруппный Six-group	<i>З – С3 – А – О – Ч – Б</i>
План формирования по станции <i>О</i> Formation plan for station <i>О</i>					
<i>С3</i>	Передаточный Transfer	66,38	1,14	Одногруппный Single-group	<i>С3</i>
План формирования по станции <i>А</i> Formation plan for station <i>А</i>					
<i>С3</i>	Передаточный Transfer	48,23	0,83	Одногруппный Single-group	<i>С3</i>
План формирования по станции <i>С3</i> Formation plan for station <i>С3</i>					
<i>У2</i>	Передаточный Transfer	38,64	1,29	Одногруппный Single-group	<i>У2</i>
<i>З</i>	Участковый	95,77	1,81	–	<i>З</i>



	Sectional				
<i>В нечетном направлении</i> <i>In the odd direction</i>					
План формирования по станции З Formation plan for station Z					
<i>CI</i>	Сквозной Through	153,17	2,25	Двухгруппный Two-group	<i>H CI</i>
<i>Д</i>	Сквозной Through	138,62	2,04	Двухгруппный Two-group	<i>Е Д (Д, III, C2, X, Э)</i>
<i>У</i>	Сквозной Through	104,7	1,54	Двухгруппный Two-group	<i>У (У, 32, A1, A2, X1) T1</i>
<i>Ч</i>	Сборный Prefabricated	213,76	3,05	Пятигруппный Five-group	<i>C3 (C3, У2) А (А,Б2) – О – III – Ч</i>
План формирования по станции Ч Formation plan for station Ch					
<i>У</i>	Сборный Prefabricated	173,26	2,89	Двухгруппный Two-group	<i>У Б (Б, Б1, М)</i>
План формирования по станции У Formation plan for station U					
<i>Т1</i>	Передаточный Transfer	113,82	3,00	Четырехгруппный Four-group	<i>Т1</i>
<i>Д</i>	Сборный Prefabricated	176,84	2,72	Шестигруппный Six-group	<i>CI – Е – Д (Д, III) – C2 (C2, Э, X) – 32 – A1</i>
План формирования по станции Э Formation plan for station E					
<i>Д</i>	Участковый Sectional	31,09	1,35	Двухгруппный Two-group	<i>Д X (X, C2)</i>
План формирования по станции Х2 Formation plan for station X2					
<i>Д</i>	Сборный Prefabricated	29,32	1,33	Двухгруппный Two-group	<i>Д C2</i>
План формирования по станции Д Formation plan for station D					
<i>Е</i>	Передаточный Transfer	184,03	2,63	Одногруппный Single-group	<i>Е</i>
<i>CI</i>	Участковый Sectional	75,16	1,25	Двухгруппный Two-group	<i>Н CI</i>
План формирования по станции С Formation plan for station C					
<i>Н</i>	Передаточный Transfer	257,3	3,68	Одногруппный Single-group	<i>Н</i>

Согласно данным предлагаемого плана формирования, количество формируемых назначений в четном направлении с 26 поездов уменьшилось до 18 поездов в сутки: по станции *Е* – 1 вместо 2, *Д* – 3 вместо 6, *У* – 3 вместо 4, *Ч* – 1 вместо 2, *Ф* – 1 вместо 2, *С3* – 2 вместо 3.

Всего в четном направлении сокращено 8 назначений. Число групп в формируемых назначениях уменьшено на 11, т. е. с 43 до 32 поездов.

По предлагаемому плану формирования количество назначений в нечетном направлении уменьшилось с 22 до 20 поездов в сутки: по станции *Б1* – 1 вместо 2, *У* – 2 вместо 3.

Число групп сократилось на 7, т. е. с 40 до 33.

По данным табл. произведено построение графического отображения предлагаемого плана формирования с учетом особенностей работы УБЖД (рис. 4).

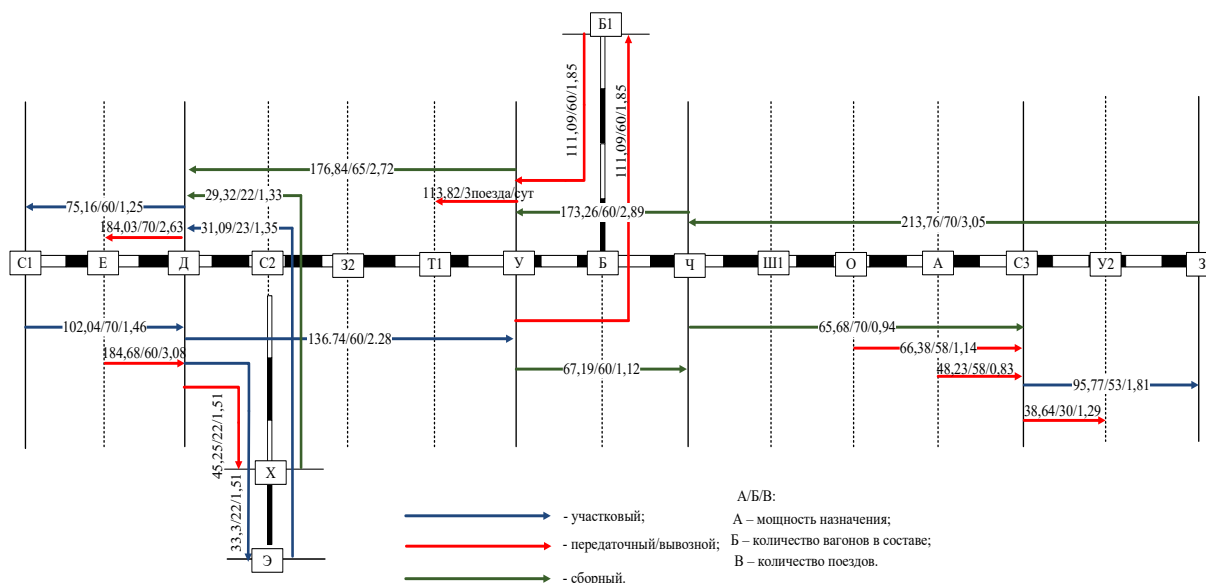


Рис. 4. Предлагаемый план формирования местных поездов

Fig. 4. Proposed plan for the formation of local trains

По предлагаемому плану формирования:

– в четном направлении формируется всего 15 назначений, из них 2 сквозных, 5 участковых, 2 сборных, 6 передаточных;

– в нечетном направлении формируется всего 13 назначений, из них 3 сквозных, 2 участковых, 4 сборных, 4 передаточных.

### Экономическая оценка предлагаемого оптимизационного решения

Расчеты показали, что при сокращении числа формируемых назначений снижается время простоя вагона под накоплением. Уменьшение величины вагоно-часов простоя под накоплением составило 6 270. Время простоя одного вагона под накоплением сократилось в среднем на 5,12 ч.

При уменьшении числа групп вагонов, подбираемых в соответствии с планом формирования, снижается время нахождения вагона в процессе формирования [12].

Время на формирование многогруппного состава складывается из времени, затрачиваемого на сортировку вагонов и их сборку. В нашем случае при изменении числа групп в поезде время на сортировку накопленных вагонов практически не меняется, но время, затрачиваемое на сборку, будет находиться в зависимости от числа групп в формируемом составе [12].

Время на сборку вагонов, согласно предлагаемому варианту, составит: для четырех-

группного поезда – 18,3 мин, для трехгруппного поезда – 15,0 мин.

Таким образом, экономия времени, затраченного на технологический процесс формирования при сокращении одной группы, составит 3,3 мин.

Суммарная экономия времени, приходящегося на один вагон, при сокращении числа назначений и уменьшении количества групп составила 5,175 ч.

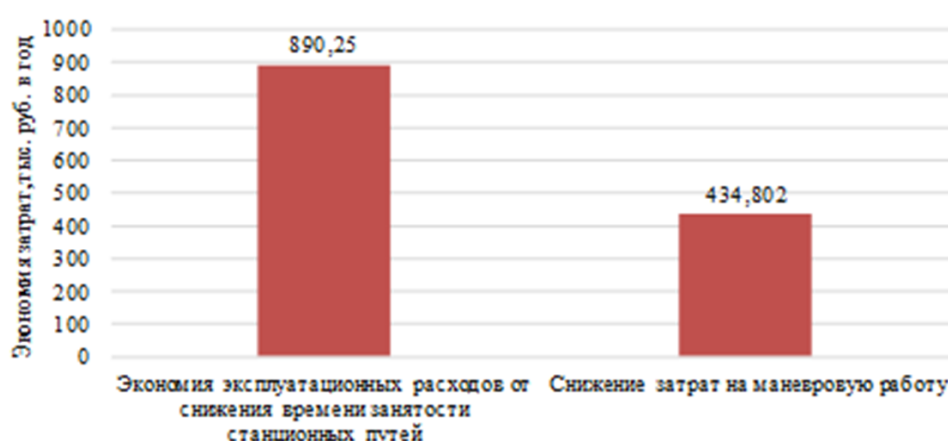
Снижение времени нахождения вагона в процессах накопления и формирования приведет к более быстрому высвобождению станционных путей из-под текущих технологических операций.

Расчет показал, что экономия поездо-часов занятия станционных путей составила 111,22 поездо-часа в сутки или 890,254 тыс. руб. в год.

Следует отметить, что, кроме снижения рассмотренных годовых эксплуатационных расходов, снизятся затраты, связанные с маневровой работой локомотивов, выполняющих формирование составов, ускорится продвижение вагонов по железной дороге и сократится срок доставки грузов [12].

Экономия затрат, связанных с маневровой работой при сокращении количества групп в составе, равна 434,802 тыс. руб. в год.

Экономия эксплуатационных расходов от снижения времени занятости станционных пу-



**Рис. 5.** Экономия эксплуатационных расходов от реализации предложенного технического решения  
**Fig. 5.** Savings in operating costs from the implementation of the proposed technical solution

тей и затрат, связанных с маневровой работой, представлена на рис. 5.

Экономическая оценка предлагаемого плана формирования включает в себя экономию эксплуатационных расходов от снижения времени занятости станционных путей и затрат, связанных с маневровой работой. Суммарная экономия составляет 1 325,054 тыс. руб. в год [20, 21].

### Заключение

Целью представленного исследования являлись проведение комплексного анализа и разработка предложения по оптимизации плана формирования поездов УБЖД с экономической оценкой предлагаемого варианта оптимизационного решения.

В соответствии с предлагаемым планом формирования количество назначений в четном направлении уменьшилось с 22 до 14. Всего в четном направлении сокращено 8 назначений. Кроме того, число групп в формируемых назначениях уменьшено на 11 поездов (с 43 до 32).

Количество формируемых назначений в нечетном направлении уменьшилось с 15 до 13. Число групп сократилось на 7 поездов (с 40 до 33).

Для экономической оценки предлагаемого плана формирования рассчитана экономия эксплуатационных расходов от снижения времени занятости станционных путей и затрат, связанных с маневровой работой. Суммарная экономия составляет 1 325,054 тыс. руб. в год.

### Список литературы

1. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <http://www.rzd.ru> (Дата обращения: 26.08.2025).
2. Транспорт Монголии: недавние успехи в строительстве железных дорог // New Eastern Outlook : сайт. URL : <https://journal-neo.su/ru/2023/10/21/transport-mongolii-nedavnie-uspehi-v-stroitelstve-zheleznyh-dorog> (Дата обращения: 28.08.2025).
3. Правительство Монголии представило программу действий на четыре года // БуряадҮнэн : сайт. URL : <https://burunen.ru/news/society/131542-pravitelstvo-mongolii-predstavilo-programmu-deystviy-na-chetyre-goda> (Дата обращения: 27.08.2025).
4. О транспортных перспективах и надеждах Монголии // Монголия сейчас : сайт. URL : <http://www.mongolnow.com/9970-2> (Дата обращения: 27.08.2025).
5. Политика долгосрочного развития Монголии: «Видение – 2050» // Монголия сейчас : сайт. URL : <http://www.mongolnow.com/politika-dolgosrochnogo-razvitiya-mongolii-videnie-2050/> (Дата обращения: 27.08.2025).
6. Премьер-министр Монголии представил программу развития страны // Красная Весна : сайт. URL : <https://rossaprimavera.ru/news/230fd96a> (Дата обращения: 27.08.2025).
7. ГК 1520 и «Монгольские Железные Дороги» будут развивать железнодорожную инфраструктуру Монголии // Comnews.ru : сайт. URL : <https://www.comnews.ru/content/230028/2023-11-08/2023-w45/1011/gk-1520-i-mongolskie-zheleznye-dorogi-budut-razvivat-zheleznodorozhnuyu-infrastrukturu-mongolii> (Дата обращения: 27.08.2025).
8. Архит Б., Оленцев В.А. Проблемы инфраструктурного комплекса железных дорог Монголии // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2024) : электрон. сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2024. С. 12–14. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=73390750>. (Дата обращения: 28.08.2025).

9. Буяннэмэх А., Оленцевич В.А. Перспективы развития дорожно-транспортного сектора Монголии в условиях роста грузопотока // Транспорт и логистика: развитие в условиях цифровизации экономики : сб. науч. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2025. С. 19–21.
10. Оленцевич В.А., Архит Б. Рост транзитного грузопотока как ключевой фактор развития железных дорог Монголии // Экономика железных дорог. 2025. № 7. С. 85–97.
11. Социально-экономические механизмы на транспорте / Е.Л. Андреянова, Н.А. Анисимова, Н.А. Афанасьева и др. Красноярск : КРИЖТ ИрГУПС, 2025. 239 с.
12. Об утверждении методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования : приказ Минтранса РФ от 18.07.2018 г. № 266.
13. Белоголов Ю.И., Стецова Ю.М., Оленцевич А.А. Использование методов математического моделирования при управлении транспортными процессами на железной дороге // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т. 1. С. 145–148.
14. Серегин И.В. Моделирование работы железнодорожного узла в условиях неравномерного подвода поездопотока // Экономика железных дорог. 2025. № 1. С. 38–49.
15. Иванков А.Н., Четчуев М.В. Проблемы поэтапного наращивания мощности объектов железнодорожной инфраструктуры для овладения перевозками // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : тр. междунар. науч.-практ. конф. посвящ. 125-летию университета. М., 2024. С. 228–232.
16. Кекиш Н.А. Сравнительный анализ изменения потребной пропускной способности при освоении грузопотока повагонной и контейнерной технологиями перевозки // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 2 (110). С. 45–52.
17. Недоступ И.С., Карпец О.В. Возможности улучшения пропускной способности восточного направления РФ // Молодежь. Наука. Инновации. 2025. Т. 1. С. 299–303.
18. Тарасова О.В., Урина У.С., Горюшкина Е.А. Оценка вариантов использования мощностей Восточного полигона // Проблемы прогнозирования. 2025. № 2 (209). С. 167–179.
19. Оленцевич В.А., Власова Н.В., Каимов Е.В. Техническая эксплуатация железнодорожного транспорта и безопасность движения. М. : УМЦ ЖДТ, 2025. 136 с.
20. Каутц В.Э., Журавлева О.В. Алгоритм повышения плановой эффективности работы предприятия на примере Восточно-Сибирской железной дороги // Экономика и предпринимательство. 2025. № 8 (181). С. 1380–1383.
21. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте : утв. указанием МПС России № 1024-у от 31.08.1998.

## References

1. Rossiiskie zheleznye dorogi (elektronnyi resurs) [Russian Railways (electronic resource)]. Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed August 26, 2025).
2. Transport Mongolii: nedavnie uspekhi v stroitel'stve zheleznykh dorog (Elektronnyi resurs) [Mongolia's transport: recent successes in railway construction (Electronic resource)]. Available at: <https://journal-neo.su/ru/2023/10/21/transport-mongolii-nedavnie-uspehi-v-stroitelstve-zheleznykh-dorog> (Accessed August 28, 2025).
3. Pravitel'stvo Mongolii predstavilo programmu deistvii na chetyre goda (Elektronnyi resurs) [The Government of Mongolia has submitted a four-year action program (Electronic resource)]. Available at: <https://burunen.ru/news/society/131542-pravitelstvo-mongolii-predstavilo-programmu-deystviy-na-chetyre-goda> (Accessed August 27, 2025).
4. O transportnykh perspektivakh i nadezhдах Mongolii (Elektronnyi resurs) [About Mongolia's transport prospects and hopes (Electronic resource)]. Available at: <http://www.mongolnow.com/9970-2> (Accessed August 27, 2025).
5. Politika dolgosrochnogo razvitiya Mongolii: «Videnie – 2050» (Elektronnyi resurs) [Mongolia's Long-term Development Policy: «Vision – 2050» (Electronic resource)]. Available at: <http://www.mongolnow.com/politika-dolgosrochnogo-razvitiya-mongolii-videnie-2050/> (Accessed August 27, 2025).
6. Prem'er-ministr Mongolii predstavil programmu razvitiya strany (Elektronnyi resurs) [The Prime Minister of Mongolia presented the country's development program (Electronic resource)]. Available at: <https://rossaprimavera.ru/news/230fd96a> (Accessed August 27, 2025).
7. GK 1520 i «Mongol'skie Zheleznye Dorogi» budut razvivat' zheleznodorozhnuyu infrastrukturu Mongolii (Elektronnyi resurs) [State Corporation 1520 and Mongolian Railways will develop Mongolia's railway infrastructure (Electronic resource)]. Available at: <https://www.comnews.ru/content/230028/2023-11-08/2023-w45/1011/gk-1520-i-mongolskie-zheleznye-dorogi-budut-razvivat-zheleznodorozhnuyu-infrastrukturu-mongolii> (Accessed August 27, 2025).
8. Buyannemekh A., Olentsevich V.A. Problemy infrastruktornogo kompleksa zheleznykh dorog Mongolii [Problems of the infrastructure complex of the railways of Mongolia]. *Elektronnyi sbornik trudov II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi na transporte (UERT-2024)»* [Electronic proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Management of operational work in transport (MOWT-2024)»]. Saint Petersburg, 2024, pp. 12–14.
9. Buyannemekh A., Olentsevich V.A. Perspektivy razvitiya dorozhno-transportnogo sektora Mongolii v usloviyakh rosta gruzopotoka [Prospects for the development of Mongolia's road transport sector in the context of increasing freight traffic]. *Sbornik nauchnykh trudov IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport i logistika: razvitie v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Transport and logistics: development in the context of the digitalization of the economy»]. Rostov-on-Don, 2025, pp. 19–21.
10. Olentsevich V.A., Buyannemekh A. Rost tranzitnogo gruzopotoka kak klyuchevoi faktor razvitiya zheleznykh dorog Mongolii [Growth of transit freight traffic as a key factor in the development of Mongolia's railways]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of railways], 2025, no 7, pp. 85–97.

11. Andreyanova E.L., Anisimova N.A., Afanasyeva N.A. et al. *Sotsial'no-ekonomicheskie mekhanizmy na transporte* [Socio-economic mechanisms in transport]. Krasnoyarsk: KrZHT Publ., 2025. 239 p.
12. Prikaz Mintransa RF ot 18.07.2018 g. № 266 «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 throughput and carrying capacity of the infrastructure of public railway transport»].
13. Belogolov Yu.I., Stetsova Yu.M., Olentsevich A.A. *Ispol'zovanie metodov matematicheskogo modelirovaniya pri upravlenii transportnymi protsessami na zheleznoi doroге* [The use of mathematical modeling methods in the management of transport processes on the railway]. *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. 1, pp. 145–148.
14. Seregin I.V. *Modelirovanie raboty zheleznodorozhnogo uzla v usloviyakh neravnomernogo podvoda poezdopotoka* [Modeling the operation of a railway junction in conditions of uneven supply of train traffic]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of railways], 2025, no 1, pp. 38–49.
15. Ivankov A.N., Chetchuev M.V. *Problemy poetapnogo narashchivaniya moshchnosti ob'ektov zheleznodorozhnoi infrastruktury dlya ovladeniya perevozkami* [Problems of step-by-step capacity increase of railway infrastructure facilities for mastering transportation]. *Trudy yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Akademik Vladimir Nikolaevich Obratsov – osnovopolozhnik transportnoi nauki»* [Proceedings of the jubilee international scientific and practical conference «Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov – the founder of transport science»]. Moscow, 2024, pp. 228–232.
16. Kekish N.A. *Sravnitel'nyi analiz izmeneniya potrebnoi propusknoi sposobnosti pri osvoenii gruzopotoka povagonnoi i konteinernoi tekhnologiyami perevozki* [Comparative analysis of changes in the required throughput during the development of freight traffic by wagon and container transportation technologies]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region], 2025, no 2 (110), pp. 45–52.
17. Nedostup I.S., Karpets O.V. *Vozmozhnosti uluchsheniya propusknoi sposobnosti vostochnogo napravleniya RF* [Possibilities of improving the capacity of the eastern direction of the Russian Federation]. *Molodezh'. Nauka. Innovatsii* [Youth. Science. Innovation], 2025, Vol. 1, pp. 299–303.
18. Tarasova O.V., Urina U.S., Goryushkina E.A. *Otsenka variantov ispol'zovaniya moshchnosti Vostochnogo poligona* [Evaluation of options for using the capacities of the Eastern polygon]. *Problemy prognozirovaniya* [Problems of forecasting], 2025, no 2 (209), pp. 167–179.
19. Olentsevich V.A., Vlasova N.V., Kaimov E.V. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya zheleznodorozhnogo transporta i bezopasnost' dvizheniya* [Technical operation of railway transport and traffic safety]. Moscow: UMTS ZhDT Publ., 2025. 136 p.
20. Kautts V.E., Zhuravleva O.V. *Algoritм povysheniya planovoi effektivnosti raboty predpriyatiya na primere Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi* [An algorithm for increasing the planned efficiency of an enterprise using the example of the East Siberian Railway]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and entrepreneurship], 2025, no 8 (181), pp. 1380–1383.
21. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke investitsionnykh projektov na zheleznodorozhnom transporte (prilozhenie k Ukazaniyu MPS Rossii ot 31.08.1998 № 1024-u)* [Methodological recommendations for the evaluation of investment projects in railway transport (appendix to the Instruction of the Ministry of Railways of Russia dated August 31, 1998 No 1024-u)].

### Информация об авторах

**Оленцевич Виктория Александровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olencevich\_va@mail.ru.

### Authors

**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.

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**INFORMATION TECHNOLOGY**

## Роль библиотек в эпоху искусственного интеллекта: аналитический взгляд на новые ИИ-технологии и их применение

И.Л. Трофимов<sup>1,2</sup>✉, Е.М. Кустова<sup>1</sup>, С.М. Бараш<sup>1</sup>, А.В. Буряк<sup>1</sup>, В.Н. Филатова<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Государственная публичная научно-техническая библиотека Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉t\_john88@mail.ru

### Резюме

В статье рассматривается трансформация роли современных библиотек в условиях «цифровой неопределенности» и стремительного развития технологий искусственного интеллекта. Авторы выполнили ретроспективный обзор эволюции нейросетевых архитектур – от первых вероятностных моделей перцептрона Фрэнка Розенблатта и рекуррентных сетей, решивших проблему долгосрочной памяти, до современных трансформеров и больших языковых моделей, обосновав неизбежность текущего технологического перехода. В работе систематизированы передовые инструменты генеративно-го искусственного интеллекта, включая диффузионные модели визуализации (Stable Diffusion), технологии распознавания речи и понимания структуры документов с детальной оценкой перспектив их внедрения в процессы сохранения научного наследия. Особый акцент сделан на риски «информационного шума», галлюцинации нейронных сетей и размывание понятия авторства, что актуализирует новую роль библиотеки как гаранта верифицированного знания в соответствии с принципами Международной федерации библиотечных ассоциаций. Практическая значимость исследования заключается в техническом описании опыта Центральной научной библиотеки Федерального исследовательского центра Иркутского института химии им. А.Е. Фаворского Сибирского отделения Российской академии наук по разработке локальной интеллектуальной поисковой системы для эффективного поиска и анализа содержания научной литературы. Представлена архитектура на основе методологии Retrieval Augmented Generation и локальных языковых моделей, которая обеспечивает семантический поиск по оцифрованным профильным (в том числе химическим) фондам, суверенитет данных и верифицируемость ответов со ссылками на первоисточники.

### Ключевые слова

искусственный интеллект, цифровая неопределенность, информационный шум, генеративные нейронные сети, интеллектуальная поисковая система, Retrieval Augmented Generation, семантический поиск, верификация, научное наследие, большие языковые модели

### Для цитирования

Роль библиотек в эпоху искусственного интеллекта: аналитический взгляд на новые ИИ-технологии и их применение / И.Л. Трофимов, Е.М. Кустова, С.М. Бараш, А.В. Буряк, В.Н. Филатова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 94–104. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).94-104.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 02.09.2025 г.; поступила после рецензирования: 10.09.2025 г.; принята к публикации: 12.09.2025 г.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках инициативной научно-исследовательской работы по теме «Использование и развитие методов и алгоритмов искусственного интеллекта для поиска и анализа научной литературы по химии».

## The role of libraries in the age of artificial intelligence: an analytical look at emerging AI technologies and their applications

I.L. Trofimov<sup>1,2</sup>✉, E.M. Kustova<sup>1</sup>, S.M. Barash<sup>1</sup>, A.V. Buryak<sup>1</sup>, V.N. Filatova<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Federal Research Center «Irkutsk Institute of Chemistry named after A.E. Favorskii», the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation,

<sup>2</sup>State Public Scientific and Technical Library, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, the Russian Federation

✉t\_john88@mail.ru

### Abstract

This comprehensive study presents a fundamental analysis of the transformation of the functional role of modern scientific libraries in the context of global «digital uncertainty» and the exponential development of generative artificial intelligence technologies. The

authors conduct a deep retrospective review of the evolution of neural network architectures – from Frank Rosenblatt's first probabilistic perceptron models and recurrent networks that solved the problem of long-term memory, to modern Transformers and Large Language Models, justifying the inevitability of the current technological transition. The study systematizes advanced generative AI tools, including diffusion visualization models (Stable Diffusion), speech recognition technologies, and document structure understanding, with a detailed assessment of the prospects for their implementation in cultural heritage preservation processes. Special emphasis is placed on the risks of «information noise», neural network hallucinations, and the blurring of the concept of authorship, which updates the library's new mission as a guarantor of verified knowledge in accordance with the International Federation of Library Associations principles. The practical significance of the research lies in the detailed technical description of the experience of the Central Scientific Library of the Irkutsk Institute of Chemistry named after A.E. Favorskii of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in developing an autonomous intelligent search system. The architecture of the solution based on the Retrieval Augmented Generation methodology, local large language models, and efficient fine-tuning methods is presented, ensuring deep semantic search across chemical collections while maintaining full data sovereignty and answer verifiability.

### Keywords

artificial intelligence, digital uncertainty, information noise, generative neural networks, intelligent search engine, Retrieval Augmented Generation, semantic search, verification, scientific heritage, large language models

### For citation

Trofimov I.L., Kustova E.M., Barash S.M., Buryak A.V., Filatova V.N. Rol' bibliotek v epokhu iskusstvennogo intellekta: analiticheskiy vzglyad na novye IT-tehnologii i ikh primeneniye [The role of libraries in the age of artificial intelligence: an analytical look at emerging AI technologies and their applications]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2025. № 3(87). Pp. 94–104. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).94-104.

### Article Info

Received: September 2, 2025; Revised: September 10, 2025; Accepted: September 12, 2025.

### Acknowledgement

The work was carried out as part of an initiative research project on the topic «The use and development of artificial intelligence methods and algorithms for the search and analysis of scientific literature on chemistry».

### Введение

Современный этап развития информационного общества характеризуется экспоненциальным ростом объемов данных и, как следствие, снижением их достоверности. Наряду с целенаправленной деятельностью по формированию цензурных ограничений и дезинформации (создаваемой по различным причинам) мы наблюдаем лавинообразный рост объемов данных, сгенерированных искусственными нейронными сетями, способными создавать текст и практически неотличимые от человеческих изображения и видео. Мы вступили в эпоху «цифровой неопределенности», где границы между верифицированным научным знанием и контентом, сгенерированным автоматическими алгоритмами, становятся все более размытыми. В этом контексте библиотеки перестают быть пассивным хранилищем физических носителей информации. Они трансформируются в активный субъект цифровой среды, выполняющий функцию «якоря» достоверности – опоры проверенной информации в нарастающем потоке *информационного шума*.

Фундаментальная проблема, стоящая перед библиотеками, выходит за рамки простой автоматизации каталогов. Речь идет об обеспе-

чении сохранности и доступности научного наследия выдающихся ученых с использованием новых технологий искусственного интеллекта (ИИ) с учетом возможностей, ограничений и рисков их применения в библиотечной сфере.

Целью данной работы является анализ возможностей, ограничений и рисков практического применения генеративного ИИ в библиотеках, а также описание проекта создания интеллектуальной поисковой системы в Центральной научной библиотеке (ЦНБ) Федерального исследовательского центра Иркутского института химии им. А.Е. Фаворского (ИрИХ) СО РАН.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- рассмотреть развитие ИИ-технологий от узкоспециализированных систем к мультимодальным моделям;
- систематизировать основные классы ИИ-инструментов, применимых в библиотечной сфере;
- обосновать новую роль библиотеки как «опоры проверенной достоверной информации»;
- разработать архитектуру интеллектуальной поисковой системы и нейросетевой модели на основе Retrieval Augmented Generation



(RAG), обеспечивающей суверенитет данных и высокую релевантность поиска для сохранения научного наследия.

Структура работы включает обзор эволюции развития нейросетей, классификацию генеративных технологий (визуализация, машинное зрение, звук, код, текст), анализ проблемы достоверности информации и описание практического применения ИИ в научнотехнической библиотеке.

### Эволюция нейросетей

Понимание потенциала ИИ невозможно без анализа его истории и технологической эволюции. Путь от простейших математических абстракций до систем, способных проходить тест Тьюринга, занял более полувека и выдержал несколько смен парадигм.

*Ранние нейронные сети (1940–1980 гг.).* Эпоха ИИ началась с попыток математически формализовать работу биологического нейрона. Ключевой вехой стала работа Ф. Розенблатта, который в 1958 г. представил концепцию перцептрона – вероятностной модели для хранения и организации информации в мозге [1]. Перцептрон – простейшая однослойная сеть, способная обучаться бинарной классификации (вывод «да/нет») путем коррекции весовых коэффициентов. Но эти модели оказались непригодны для сложной работы с текстом и контекстом.

*Рекуррентные сети (1980–1990 гг.).* Для обработки естественного языка (NLP), который по своей сути является временной последовательностью, требовалась архитектура, обладающая «памятью». Это привело к появлению рекуррентных нейронных сетей (RNN), где выход нейрона подавался обратно на его вход. Однако классические RNN страдали от проблемы «затухающего градиента»: при обучении на длинных текстах сеть «забывала» начало предложения к моменту его полного прочтения [2]. Решением стала архитектура Long Short-Term Memory (LSTM), предложенная З. Хохрайтером и Ю. Шмидхубером в 1997 г. [3]. LSTM внедрила механизм «вентилей» (gates) – входного, выходного и вентиля забывания, которые позволяли сети целенаправленно сохранять важную информацию на длительные промежутки времени и сбрасывать ненужную. Это стало фундаментом для машинного перевода и распознавания речи на следующие два десятилетия.

*Трансформеры (2017).* Настоящий прорыв произошел с появлением доступных вычислительных мощностей GPU и больших данных. В 2015 г. Я. Лекун, Й. Бенджио и Дж. Хинтон опубликовали в журнале «Nature» манифест «Deep Learning», закрепивший доминирование глубоких многослойных архитектур [4]. Однако революцией в обработке текстов стала статья 2017 г. «Attention Is All You Need» (А. Васвани и др.) [5], представившая архитектуру Трансформера (Transformer). Трансформеры отказались от рекуррентности в пользу механизма «внимания» (Self-Attention) [6]. Это позволило обрабатывать все слова в предложении параллельно, а не последовательно, а также учитывать глобальный контекст (модель понимает связь между словами, даже если они находятся в разных концах текста).

*Большие языковые модели (2020).* Масштабирование трансформеров (увеличение количества параметров и слоев) привело к появлению Больших языковых моделей (LLM), таких как GPT-3, LLaMA. Как отмечает М.М. Тихомиров, увеличение количества параметров (до сотен миллиардов) привело к появлению эмерджентных свойств: *Few-shot learning* (обучение на малых примерах) и *In-context learning* (обучение в контексте) [7]. Однако такие модели были склонны к «галлюцинациям» – генерации правдоподобного, но ложного текста. Это происходило из-за того, что модель оптимизирована на вероятностное продолжение текста, а не на проверку фактов. Для библиотек это создает существенный риск: система может выдумать несуществующую книгу, источник или приписать ученому открытие, которого он не совершал.

*Мультимодальные модели с рассуждением (настоящее время).* Современный этап (2022–2025 гг.) характеризуется переходом к моделям, способным к «рассуждению» (Reasoning). Метод Chain-of-Thought (цепочка мыслей) (Дж. Вэй и др.) [8] позволяет моделям не просто предсказывать следующее слово, а выстраивать пошаговую логическую цепочку решения задачи. Это критически важно для анализа научной литературы, где выводы требуют дедукции, а не простого поиска совпадений. Такие модели (например, уровня GPT-4 или Claude) способны к кросс-доменному анализу, связывая текст, изображения и формулы в единое смысловое поле (мультимодальность), од-

нако они требуют решения серьезных этических и технических вызовов, связанных с ответственностью и безопасностью генерируемых данных.

### Инструментарий искусственного интеллекта для современной библиотеки

*Генеративные технологии визуализации.* Диффузионные модели (Stable Diffusion, Midjourney и др.) позволяют библиотекам визуализировать архивные и другие данные. Фундаментальной работой здесь является исследование Р. Ромбаха и др. (2022) «High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models» [9], которое легло в основу *Stable Diffusion*. Авторы предложили проводить процесс диффузии (восстановления изображения из шума) не в пиксельном пространстве, а в сжатом латентном пространстве, что радикально снизило требования к вычислительным ресурсам.

Для библиотек особенно важна точность реконструкции изображений, архивных фото и др. Для этого применяется технология

*ControlNet* (Л. Жанг и др.) (2023) [10]. ControlNet решает проблему хаотичности генерации, «замораживая» веса основной модели и добавляя обучаемую копию слоев для управления структурой. Это позволяет интегрировать пространственные управляющие элементы:

1. MLSD (Mobile Line Segment Detection). Идеален для распознавания линий и архитектурных форм. В библиотеке может применяться для создания моделей библиотечных пространств («библиотеки будущего») и т.д.

2. Depth, Canny и др. Используются для точного сохранения композиции при обработке изображений. Также их можно применять для «маскирования» частей изображения, например, когда нужно передать строго определенную форму, не трогая все остальное.

Не менее важна технология *LoRA* (Low-Rank Adaptation) (Э.Дж. Хью и др.) (2021) [11]. Она позволяет адаптировать (дообучать) огромные модели под специфические задачи, используя «дополнительные» слои. Изменение «весов» LoRA влияет на силу ее воздействия на



Рис. 1. Реставрация архивных фотографий ученого при оформлении выставок

Fig. 1. Restoration of archival photo of the scientist for exhibition design

основную модель. Пример использования LoRA на стиле газетных вырезок («newspaper collage style») позволяет генерировать изображения, стилизованные под прессу прошлых веков, что актуально для оформления выставок или цифровых проектов библиотеки.

Практическое применение в библиотеках:

1. Восстановление фото. Использование инструментов типа Remini (app.remini.ai) для улучшения качества старых снимков ученых или событий (рис. 1).

2. 3D-визуализация. Применение инструментов на подобии TripoSG или Krea.ai для создания трехмерных моделей на основе отсканированных изображений из книг и статей.

3. Генерация иллюстраций. Создание схем, фонов и визуальных материалов для выставок или презентаций.

*Генерация видеоконтента.* Переход от статических изображений к динамическим последовательностям (видео) в современных моделях сопровождается решением проблемы темпоральной согласованности (консистентности) кадров. Современные модели (Sora, Runway, Pika, Luma, Kling, Veo, Wan) способны не только генерировать качественное видео, но и синхронизировать движение губ с речью (lipsync).

В контексте библиотеки это позволяет:

- создавать «ожившие» портреты исторических деятелей и ученых, например для образовательных целей;
- формировать виртуальные туры по архивам и фондам;
- визуализировать сложные исследовательские процессы, описанные в научной литературе.

*Машинное зрение.* Модели компьютерного зрения (CV) или визуальные модели (ViT, Florence, YOLO) интегрируют текст и изображение. Это открывает путь к автоматической каталогизации книг по отсканированным карточкам или фото обложек, OCR (распознавание текста) для рукописных архивных документов, а в перспективе – для распознавания химических структурных формул и схем реакций непосредственно со страниц старых изданий.

*Генерация звука и речи.* Современные системы «текст-в-речь» (Text-to-Speech, TTS) (ElevenLabs, Whisper, AudioLM) достигли уровня синтеза естественной речи с сохранением интонаций. Для работы с аудиоархивами (лекции, устные повествования) стандартом

стала модель Whisper от OpenAI (А. Рэдфорд и др.) (2022) [12]. Однако, несмотря на существующие сложности с синтезом речи на русском языке, для некоторых моделей прогресс очевиден. Это открывает путь к автоматическому созданию аудиокниг и аудиогидов по документам из фондов библиотеки, делая фонды доступными, например для слабовидящих.

*Генерация кода и программные агенты.* Инструменты вроде MS Copilot, Claude Code, Gemini, DeepSeek Coder позволяют сотрудникам библиотеки, даже не обладая глубокими навыками программирования, создавать программные сервисы для решения широкого круга задач: от скриптов автоматизации до веб-интерфейсов поисковых систем.

*Языковые модели – генерация текста.* Ключевой ИИ-технологией для научных библиотек является создание интеллектуальных систем, понимающих смысл текста, а не просто наличие ключевых слов. Для этого используются технологии векторных представлений и трансформеров. Как указывалось ранее, трансформеры полагаются на механизм внимания, чтобы понимать контекст, они оценивают, насколько важны отдельные слова в последовательности по отношению друг к другу.

Для поиска используются векторные представления (эмбединги) – многомерные списки чисел, описывающих параметры модели. Векторное представление запроса сравнивается с векторами в базе данных (БД) для нахождения ближайших соседей (ближайших по смыслу понятий). Этот принцип позволяет находить документы, близкие по смыслу, даже если в них не используются идентичные слова. Обычно для этого применяется косинусное сходство или евклидово расстояние (1):

$$d_{pq} = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2}, \quad (1)$$

где  $d_{pq}$  – евклидово расстояние между двумя векторами (понятиями);  $p_i$  ( $i \in 1 \dots n$ ) – вектор первого условного понятия (слова, токена) среди множества  $i$ -понятий;  $q_i$  – вектор второго условного понятия (слова, токена).

*Эволюция «мышления» моделей: от текстовых шаблонов к рассуждению.* С 2023–2024 гг. мы наблюдаем переход к мультимодальным моделям с элементами рассуждения (GPT-4.5, Claude 3.5, Ernie-X1). Эти системы способны к кросс-доменному обучению. Они одновременно обрабатывают текст, изображения, видео и про-

граммный код, находя общие смыслы в разных модальностях. Технология рассуждения (Reasoning) позволяет модели не просто выдавать ответ, а выстраивать логическую цепочку:

– Chain-of-Thought (цепочка мыслей) – пошаговое рассуждение, имитирующее человеческую логику;

– Tree-of-Thought (дерево мыслей) – анализ нескольких возможных вариантов решения задачи перед формулированием ответа;

– верификация – способность к самопроверке и коррекции собственных выводов («что, если моя посылка неверна?»).

Такие модели способны к абстрактному мышлению и пониманию нюансов, что делает их идеальными помощниками для сложного информационного поиска в научных библиотеках. Они могут проанализировать изображение, график, схему, химическую формулу в книге или научной статье, сопоставить их с текстом и сделать вывод, недоступный простым текстовым анализаторам.

### **Проблема «информационного шума» и роль библиотек**

Внедрение ИИ приносит не только новые возможности, но и системные риски, связанные с качеством информационной среды. Нарастание объема контента, сгенерированного алгоритмами ИИ, создает «информационный шум». Этот процесс имеет несколько опасных характеристик.

1. Галлюцинации и искажение фактов: нейросети, будучи вероятностными моделями, могут генерировать тексты, которые выглядят научно и убедительно, но содержат грубые фактические ошибки. В библиотечном контексте это особенно опасно, так как искажается научное знание.

2. Рекурсивное загрязнение данных. Одной из самых серьезных угроз является обучение новых моделей ИИ на данных, сгенерированных предыдущими версиями ИИ. Это приводит к эффекту деградации моделей. Если ИИ учится на «синтетике», теряется вариативность, накапливаются ошибки, исчезают редкие и уникальные знания. Возникает замкнутый круг производства информационного мусора.

3. Уязвимость к «фейкам». Возможность генерации поддельных документов, несуществующих цитат и даже целых лженаучных статей подрывает доверие к печатному делу.

В работах А.И. Земскова эта проблема рассматривается через призму этики научных публикаций [13]. Он отмечает, что ChatGPT создает материалы, «юридически близкие к энциклопедическим статьям», но не имеющие автора, что размывает ответственность за их достоверность. А.И. Земсков указывает на риски нарушения издательской этики и на необходимость предупреждения пользователей о природе контента.

Массовое распространение ИИ-ассистентов несет в себе и образовательные риски. Чрезмерная надежда на ИИ-помощников может привести к «упрощению мышления» подрастающего поколения. Если студент получает готовый ответ от чат-бота, он теряет навык самостоятельного поиска, сопоставления источников и критического анализа. Возникает риск потери навыков самостоятельного исследования – фундаментального элемента научного познания.

«Цифровая неопределенность» – это состояние среды, в которой пользователь не может априори доверять ни тексту, ни изображению, ни видео на экране своего устройства.

В эпоху цифровой неопределенности библиотека обретает *новую роль*: она становится опорой проверенной достоверной информации. Согласно заявлению Международной федерации библиотечных ассоциаций (IFLA) о библиотеках и искусственном интеллекте (2020) [14], эта роль реализуется через несколько механизмов.

1. Хранение эталона. Физические фонды библиотек и их верифицированные цифровые копии становятся «золотым стандартом». В отличие от интернета, где текст может быть незаметно отредактирован, печатная книга в хранилище остается неизменной. Она служит точкой отсчета для проверки любой информации.

2. Экспертная верификация. Специалисты библиотек, имеющие доступ непосредственно к бумажным первоисточникам, выступают в роли квалифицированных экспертов-библиографов, способных отличить галлюцинацию нейросети от фактов.

3. Книга как инвестиция в истину. В мире информационного шума доступ к чистым, проверенным данным становится экономической ценностью. Фраза «кто владеет информацией – владеет миром» может быть дополнена: «кто владеет достоверной информацией...».

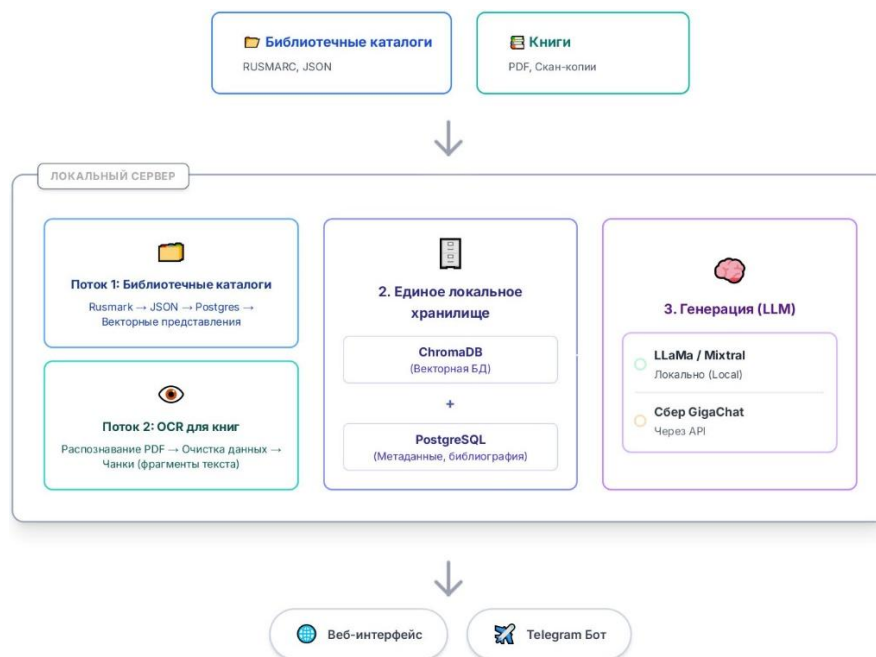


Рис. 2. Архитектура интеллектуальной поисковой системы

Fig. 2. Architecture of an intelligent search system

Я.Л. Шрайберг в своем докладе неоднократно подчеркивал, что библиотека должна стать активным участником цифрового рынка, но не как генератор шума, а как провайдер качественного знания [15]. В условиях, когда «поведенческие модели библиотек» меняются, именно функция гаранта качества становится конкурентным преимуществом.

### Проект интеллектуальной поисковой системы и его архитектура

Для решения описанных проблем в ЦНБ ИРИХ СО РАН инициирована научно-исследовательская работа по созданию интеллектуальной поисковой системы для эффективного поиска и анализа содержания научной литературы.

В основе проекта лежит принципиальный отказ от использования зарубежных облачных сервисов (таких как OpenAI, Google и др.) для обработки внутренних данных. Проект реализует автономную систему интеллектуального поиска, где данные обрабатываются на серверах организации. Архитектура проекта (рис. 2) построена на методологии RAG, впервые систематизированной П. Льюисом и др. (2020) [16].

RAG решает проблему галлюцинаций, разделяя знания на два компонента:

– параметрическая память – знания, заложенные в веса модели при обучении (умение

строить фразы, понимать язык);

– непараметрическая память – внешний индекс верифицированных документов (фонды библиотеки).

При генерации ответа модель не «выдумывает» факты из своей памяти, а использует найденные в индексе фрагменты как контекст.

### Технический процесс

1. *Обработка данных (два потока Extract-Transfer-Load – ETL).* Система реализует два параллельных конвейера подготовки данных.

1.1. Библиографический поиск (каталоги): загруженные библиографические записи, экспортированные из Ирибис64 (формат RUSMARC) конвертируются в структурированный JSON-формат. Эти метаданные индексируются и сохраняются в реляционной базе (PostgreSQL) для реализации точного (строго) поиска по библиографическим полям (индексы ББК, УДК, автор, заглавие и т.д.), и параллельно «векторизуются» для реализации смыслового поиска по аннотациям и заголовкам.

1.2. Анализ полнотекстовых коллекций документов: электронные копии книг, статей, журналов (в формате PDF) проходят через модуль OCR (оптическое распознавание символов). Система извлекает полный текст, очищает его от «артефактов» сканирования и разбивает на смысловые фрагменты (чанки) для глубокого

анализа. В перспективе будут разработаны расширенные функции модуля OCR для распознавания химических формул и реакций.

**2. Векторизация и хранение.** Фрагменты текста преобразуются в цифровые векторы (Embeddings) с помощью энкодеров (например, e5-multilingual). Эти векторы сохраняются в локальной векторной БД (ChromaDB), что позволяет искать информацию не по ключевым словам, а по смыслу.

Для адаптации модели к специфическому языку химии используется технология *LoRA* (Low-Rank Adaptation). Это универсальный математический метод, который, как было показано ранее, в контексте визуализации позволяет эффективно настраивать нейросеть без полного переобучения. В данном случае технология применяется не к диффузионным слоям, а к слоям внимания (Attention) текстового трансформера. Вместо изменения миллиардов параметров большой языковой модели, мы обучаем лишь небольшие матрицы адаптации ( $A$  и  $B$ ), внедряемые в архитектуру:  $W' = W + \Delta W = W + BA$ . Это позволяет модели понимать специфическую терминологию (например, «реакция Фаворского»), сохраняя при этом общие речевые навыки, заложенные в базовой модели.

**3. Семантический поиск (+RAG).** Когда пользователь задает вопрос, система находит в векторной БД наиболее релевантные записи либо (если пользователь выбирает строгий поиск по библиографическим полям) ищет определенные записи в реляционной базе (PostgreSQL).

**4. Генерация ответа.** Найденный контекст передается в большую языковую модель (LLM). На данном этапе также используется гибридный подход:

- приоритет отдается локальным Open-Source моделям, таким как LLaMa (модель представлена Х. Тоувроном и др. в 2023 г. и является мощной открытой моделью, допускающей коммерческое использование и локальный запуск на сервере организации) [17];

- альтернатива – API российских сервисов (Сбер GigaChat), куда отправляются только обезличенные фрагменты текста.

**5. Вывод ответа пользователю.** Сгенерированный ответ выводится пользователю либо в веб-интерфейсе на сайте библиотеки, либо в телеграмм-боте библиотеки.

Такой подход гарантирует, что научные данные не передаются третьим лицам (и зару-

бежным сервисам), а ответы системы всегда обоснованы реальными верифицированными источниками.

Предложенная архитектура обеспечивает:

- отсутствие галлюцинаций (модель не выдумывает факты, а «достает» их из достоверных источников);

- безопасность (научные данные никуда не передаются и не зависят от интернета);

- надежность (система может предоставить ссылку на конкретную страницу источника).

**Пример работы системы.** В фондах ЦНБ хранятся уникальные труды сибирских ученых. Однако доступ к их содержанию (особенно это касается старых монографий 1950-х гг.) затруднен. Традиционные каталоги (например, в ИРБис64) не позволяют сделать запрос на естественном языке. Например, на вопрос «Каковы условия реакции синтеза виниловых эфиров?» система выдаст ответ, сформированный из монографии А.Е. Фаворского с обозначением страницы и условий реакции, а также с указанием первоисточника и его библиографических данных.

## Правовые и социокультурные аспекты

Одной из главных гуманитарных задач проекта является обеспечение сохранности и популяризации научного наследия, которое зачастую существует только в бумажном виде или в виде сканов. Интеллектуальная обработка позволяет «оживить» труды ученых, сделав их доступными для современного читателя в формате естественного диалога. Это соответствует переходу библиотек на цифровую трансформацию, который отмечают в своих работах Я.Л. Шрайберг и Ю.В. Волкова, указывая на необходимость интеграции библиотек в цифровую экосистему науки.

Внедрение подобных ИИ-систем требует учета правового поля. Я.Л. Шрайберг в работе «Авторское право в отношении произведений, созданных с помощью инструментов генеративного искусственного интеллекта» (2025) [15] поднимает следующие вопросы:

- генеративный ИИ создает парадокс: произведение есть, а автора (человека) нет;

- традиционное право охраняет только результаты человеческого творчества;

- кому принадлежат права на сгенерированный текст или изображение?

А.И. Земсков развивает тему этики, фокусируясь на проблеме «открытого доступа» и ка-

честве научного контента [13]. Он предупреждает, что если библиотеки начнут массово внедрять ИИ, они рискуют размыть понятие авторства. Материалы, созданные ChatGPT, могут быть высокого качества, но они лишены субъектности.

В предлагаемом в настоящей работе проекте указанные проблемы решаются применением и использованием ИИ не как «автора», а как «интеллектуального интерфейса» к трудам реальных ученых, права на которые защищены.

При исследовании феномена «цифрового чтения» и книжной культуры [18] отмечается, что мы имеем дело с новым типом читателя. Медиасреда формирует «клиповое мышление», привычку к быстрому потреблению контента. В этой среде ИИ-инструменты (саммаризация, ответы на вопросы) могут сыграть двоякую роль: с одной стороны, они потакают лени, позволяя не читать книгу целиком, с другой – в условиях информационной перегрузки они служат навигаторами.

И.В. Лизунова подчеркивает важность «медиаэкологического подхода»: книга трансформируется, но не умирает. Она становится частью мультимедийного пространства. Библиотека должна использовать ИИ, чтобы вернуть читателя к глубокому чтению, используя технологии как «тизеры», пробуждающие интерес к полному тексту.

Представленный проект интеллектуальной поисковой системы учитывает этот аспект, предлагая пользователю (особенно молодежи) привычный формат взаимодействия (чат-бот), который служит «точкой входа» к глубокому чтению полных текстов.

## Заключение

Синтезируя технологические возможности и этические риски, мы формулируем ключевой принцип работы библиотеки с ИИ, который можно назвать «Правилom библиотекаря»: ИИ нужно применять как инструмент усиления, а не замены интеллектуальной деятельности, при этом любой контент, сгенерированный ИИ, должен иметь маркировку и сопровождаться ссылками на верифицированные первоисточники. Это правило защищает общество от информационного шума. Библиотека остается последним рубежом обороны истины, используя мощь нейросетей для поиска, но оставляя за человеком право на окончательное суждение и ответственность.

В ходе проведенного исследования были

успешно реализованы все поставленные цели и задачи, направленные на трансформацию библиотеки в активный центр верифицированного знания в эпоху ИИ. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Теоретическое обоснование и систематизация. Проведен комплексный аналитический обзор эволюции нейросетевых архитектур и инструментов генеративного ИИ. Это позволило обосновать переход от классических систем поиска к мультимодальным моделям и подтвердить необходимость внедрения «Правил библиотекаря», где ИИ выступает инструментом усиления, а не замены человеческой деятельности.

2. Разработка архитектуры. Спроектирована и теоретически обоснована оригинальная архитектура Dual-Stream Retrieval (двухпоточный поиск), обеспечивающая параллельную обработку текстово-библиографической информации и структурных данных, что позволяет эффективно интегрировать традиционные библиотечные каталоги с современными нейросетевыми методами анализа.

3. Создание инфраструктурного фундамента. Для обеспечения суверенитета данных и автономности системы был развернут локальный аппаратно-программный комплекс на базе графического процессора NVIDIA RTX 3090Ti. Это позволило отказаться от использования зарубежных облачных сервисов, гарантируя безопасность и конфиденциальность научных фондов.

4. Реализация конвейера обработки данных. Разработана методология ETL-конвейера (извлечение, преобразование, загрузка), включающая процедуры очистки текстов и сегментации страниц с использованием моделей компьютерного зрения. Сформирован и размечен пилотный корпус оцифрованных документов, прошедших первичную OCR-обработку.

5. Экспериментальная проверка. Проведено тестирование базовых открытых языковых моделей (LLaMA-3, Mistral) в режиме Zero-shot evaluation в связке с технологией RAG. Результаты подтвердили возможность точного извлечения фактографической информации из текстов при наличии верифицированного контекста из фондов библиотеки, что минимизирует риск «галлюцинаций» нейросети.

Библиотека будущего – это не фантастический «Skynet», приводящий к катастрофе, а скорее «машина времени», позволяющая вести диалог с великими умами прошлого.



Создание интеллектуальной системы в ЦНБ ИРИХ СО РАН для эффективного поиска и анализа содержания научной литературы – это шаг к тому, чтобы библиотека стала активным интеллектуальным центром. Объединяя классические формы хранения знаний и современные технологии RAG, мы создаем барьер для информационного шума и обеспечиваем суверенитет и доступность отечественного научного знания.

Представленная в работе архитектура нейросетевой модели является фундаментом

для следующего этапа исследований. В дальнейшем планируется ее «дообучение» на специализированном корпусе данных по химии (Scientific Knowledge Injection). Это позволит перейти от общего семантического поиска к мультимодальному анализу химических структур и синтезу ответов с учетом сложной предметной терминологии, что полностью соответствует задачам сохранения научного наследия в области естественных наук.

### Список литературы

1. Rosenblatt F. The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain // *Psychological Review*. 1958. Vol. 65. Iss. 6. P. 386–408.
2. Николенько С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
3. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // *Neural Computation*. 1997. Vol. 9. Iss. 8. P. 1735–1780.
4. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning // *Nature*. 2015. Vol. 521. Iss. 7553. P. 436–444. DOI 10.1038/nature14539.
5. Attention Is All You Need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar et al. // 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017). Long Beach, 2017. DOI 10.48550/ARXIV.1706.03762.
6. Transformer – новая архитектура нейросетей для работы с последовательностями // *Habr*: сайт. URL : <https://habr.com/ru/articles/341240/> (дата обращения: 05.08.2025).
7. Тихомиров М.М. Большие языковые модели // ИСП РАН : сайт. URL : <https://tpc.ispras.ru/wp-content/uploads/2023/12/lecture14-2023.pdf> (дата обращения: 05.08.2025).
8. Chain of Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models / J. Wei, X. Wang, D. Schuurmans et al. // 36th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022). Long Beach, 2022. DOI [arxiv.org/pdf/2201.11903v1](https://arxiv.org/pdf/2201.11903v1).
9. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models / R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz et al. // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. New Orleans, LA, 2022. P. 10674–10685. DOI 10.1109/CVPR52688.2022.01042.
10. Zhang L., Rao A., Agrawala M. Adding Conditional Control to Text-to-Image Diffusion Models // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Paris, 2023. P. 3836–3847. DOI 10.1109/ICCV51070.2023.00355.
11. LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models / E.J. Hu, Y. Shen, P. Wallis et al. // *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2022. DOI [arxiv.org/abs/2106.09685](https://arxiv.org/abs/2106.09685).
12. Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision / A. Radford, J.W. Kim, T. Xu et al. // *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning (ICML)*. Honolulu, 2023. URL : <https://cdn.openai.com/papers/whisper.pdf> (дата обращения: 04.08.2025).
13. Земсков А.И., Телицына А.Ю. Демонстрация возможностей чата GPT в библиотечной деятельности // *Научные и технические библиотеки*. 2024. № 4. С. 131–145.
14. IFLA Statement on Libraries and Artificial Intelligence // IFLA : сайт. URL : <https://repository.ifla.org/items/8c05d706-498b-42c2-a93a-3d47f69f7646> (дата обращения: 05.08.2025).
15. Шрайберг Я.Л., Волкова К.Ю. Вопросы авторского права в отношении произведений, созданных при помощи генеративного искусственного интеллекта // *Научные и технические библиотеки*. 2025. № 2. С. 115–130.
16. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks / P. Lewis, E. Perez, A. Piktus et al. // 34th Conference on neural information processing systems NeurIPS. 2020. URL : <https://arxiv.org/pdf/2005.11401v1> (дата обращения: 05.08.2025).
17. Llama 2: Open Foundation and Fine-Tuned Chat Models / H. Touvron, L. Martin, K. Stone et al. DOI 10.48550/arXiv.2307.09288.
18. Ёылмаз Б. Культура чтения в цифровом мире // *Книга. Чтение. Медиасреда*. 2024. Т. 2. № 1. С. 17–26.

### References

1. Rosenblatt F. The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain // *Psychological Review*, 1958, Vol. 65, iss. 6, pp. 386–408.
2. Nikolenko S., Kadurin A., Arhangel'skaya E. Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neuronnykh setei [Deep learning. Diving into the world of neural networks]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2018, 480 p.
3. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // *Neural Computation*, 1997, Vol. 9, iss. 8, pp. 1735–1780.
4. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning // *Nature*, 2015, Vol. 521, pp. 436–444. DOI: 10.1038/nature14539.
5. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need // // 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017). Long Beach, 2017. DOI 10.48550/ARXIV.1706.03762.
6. Transformer – novaya arkhitektura neirosetei dlya raboty s posledovatel'nostyami (Elektronnyi resurs) [Transformer – a new architecture of neural networks for working with sequences (Electronic resource)]. Available at: <https://habr.com/ru/articles/341240/> (Accessed August 5, 2025).



7. Tikhomirov M.M. Bol'shie yazykovye modeli (Elektronnyi resurs) [Large language models (Electronic resource)]. Available at: <https://tpc.ispras.ru/wp-content/uploads/2023/12/lecture14-2023.pdf> (Accessed August 5, 2025).
8. Wei J., Wang X., Schuurmans D., Bosma M., Ichter B., Xia F., Chi E.H., Le Q.V., Zhou D. Chain of Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Model // 36th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022). Long Beach, 2022. DOI [arxiv.org/pdf/2201.11903v1](https://arxiv.org/pdf/2201.11903v1).
9. Rombach R., Blattmann A., Lorenz D., Esser P., Ommer B. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). New Orleans, LA, 2022, pp. 10674–10685. DOI [10.1109/CVPR52688.2022.01042](https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.01042).
10. Zhang L., Rao A., Agrawala M. Adding Conditional Control to Text-to-Image Diffusion Models // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Paris, 2023, pp. 3836–3847. DOI [10.1109/ICCV51070.2023.00355](https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.00355).
11. Hu E.J., Shen Y., Wallis Ph., Allen-Zhu Z., Li Yu., Wang Sh., Wang L., Chen W. LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models // International Conference on Learning Representations (ICLR). 2022. DOI [arxiv.org/abs/2106.09685](https://arxiv.org/abs/2106.09685).
12. Radford A., Kim J.W., Xu T., Brockman G., McLeavey Ch., Sutskever I. Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision // Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning (ICML). Honolulu, 2023. Available at: <https://cdn.openai.com/papers/whisper.pdf> (August 4, 2025).
13. Zemskov A.I., Telitsyna A.Yu. Demonstratsiya vozmozhnostei chata GPT v bibliotechnoi deyatel'nosti [Demonstration of GPT chat capabilities in library activities]. *Nauchnye i tekhnicheskie biblioteki* [Scientific and Technical Libraries], 2024, no 4, pp. 131–145.
14. IFLA Statement on Libraries and Artificial Intelligence. Available at: <https://repository.ifla.org/items/8c05d706-498b-42c2-a93a-3d47f69f7646> (Accessed August 5, 2025).
15. Shraiberg Ya.L., Volkova K.Yu. Voprosy avtorskogo prava v otnoshenii proizvedenii, sozdannykh pri pomoshchi generativnogo iskusstvennogo intellekta [Copyright issues in relation to works created with the help of generative artificial intelligence]. *Nauchnye i tekhnicheskie biblioteki* [Scientific and Technical Libraries], 2025, no 2, pp. 115–130.
16. Lewis P., Perez E., Piktus A., Petroni F., Karpukhin V., Goyal N., Kuttler H., Lewis M., Yih W.-t., Rocktaschel T., Riedel S., Kiela D. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // // 34th Conference on neural information processing systems NeurIPS. 2020. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2005.11401v1> (Accessed August 5, 2025).
17. Touvron H., Martin L., Stone K., Albert P., Almahairi A., Babaei Y., Bashlykov N., Batra S., Bhargava P., Bhosale S., Bikel D., Blecher L., Canton Ferrer C., Chen M., Cucurull G., Esiobu D., Fernandes J., Fu J., Fu W., Fuller B., Gao C., Goswami V., Goyal N., Hartshorn A., Hosseini S., Hou R., Inan H., Kardas M., Kerkez V., Khabsa M., Kloumann I., Korenev A., Koura P.S., Lachaux M.-A., Lavril T., Lee J., Liskovich D., Lu Y., Mao Y., Martinet X., Mikhaylov T., Mishra P., Molybog I., Nie Y., Poulton A., Reizenstein J., Rungta R., Saladi K., Schelten A., Silva R., Smith E.M., Subramanian R., Tan X.E., Tang B., Taylor R., Williams A., Xiang J., Xu K.P., Yan Z., Zarov I., Zhang Y., Fan A., Kambadur M., Narang S., Rodriguez A., Stojnic R., Edunov S., Scialom T. Llama 2: Open Foundation and Fine-Tuned Chat Models. DOI [10.48550/arXiv.2307.09288](https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.09288).
18. Yilmaz B. Kul'tura chteniya v tsifrovom mire [Reading Culture in the Digital World]. *Kniga. Chtenie. Mediasreda* [Book. Reading. Media], 2024, Vol. 2, no 1, pp. 17–26.

### Информация об авторах

**Трофимов Иван Леонидович**, младший научный сотрудник, заведующий Центральной научной библиотеки, Федеральный исследовательский центр «Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского» СО РАН, г. Иркутск; e-mail: [t\\_john88@mail.ru](mailto:t_john88@mail.ru).

**Кустова Елена Михайловна**, младший научный сотрудник, старший библиограф Центральной научной библиотеки, Федеральный исследовательский центр «Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского» СО РАН, г. Иркутск; e-mail: [kustovahelen@mail.ru](mailto:kustovahelen@mail.ru).

**Бараи Светлана Михайловна**, младший научный сотрудник, старший библиограф Центральной научной библиотеки, Федеральный исследовательский центр «Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского» СО РАН, г. Иркутск; e-mail: [svbarash@crust.irk.ru](mailto:svbarash@crust.irk.ru).

**Буряк Алена Владимировна**, младший научный сотрудник, инженер Центральной научной библиотеки, Федеральный исследовательский центр «Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского» СО РАН, г. Иркутск; e-mail: [snejinka-88@inbox.ru](mailto:snejinka-88@inbox.ru).

**Филатова Вера Николаевна**, младший научный сотрудник, программист Центральной научной библиотеки, Федеральный исследовательский центр «Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского» СО РАН, г. Иркутск; e-mail: [verafil@yandex.ru](mailto:verafil@yandex.ru).

### Information about the authors

**Ivan L. Trofimov**, Junior Researcher, Head of the Central Scientific Library, Federal Research Center «Irkutsk Institute of Chemistry named after A.E. Favorskii» of the SB RAS, Irkutsk; e-mail: [t\\_john88@mail.ru](mailto:t_john88@mail.ru).

**Elena M. Kustova**, Junior Researcher, Senior Bibliographer of the Central Scientific Library, Federal Research Center «Irkutsk Institute of Chemistry named after A.E. Favorskii» of the SB RAS, Irkutsk; e-mail: [kustovahelen@mail.ru](mailto:kustovahelen@mail.ru).

**Svetlana M. Barash**, Junior Researcher, Senior Bibliographer of the Central Scientific Library, Federal Research Center «Irkutsk Institute of Chemistry named after A.E. Favorskii» of the SB RAS, Irkutsk; e-mail: [svbarash@crust.irk.ru](mailto:svbarash@crust.irk.ru).

**Alena V. Buryak**, Junior Researcher, Engineer of the Central Scientific Library, Federal Research Center «Irkutsk Institute of Chemistry named after A.E. Favorskii» of the SB RAS, Irkutsk; e-mail: [snejinka-88@inbox.ru](mailto:snejinka-88@inbox.ru).

**Vera N. Filatova**, Junior Researcher, Programmer of the Central Scientific Library, Federal Research Center «Irkutsk Institute of Chemistry named after A.E. Favorskii» of the SB RAS, Irkutsk; e-mail: [verafil@yandex.ru](mailto:verafil@yandex.ru).

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

**№3 (87)**  
**2 0 2 5**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **Ю.А. Трофимов**  
Ответственный за выпуск **И.Ю. Ермоленко**

Подписано в печать 26.09.2025. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 30.09.2025

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,09.

Уч.-изд. л. 8,41. Тираж 500 экз. Заказ № 3794

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ 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)