



ISSN 2223 – 9731 (Print)  
ISSN 2713 – 2560 (Online)

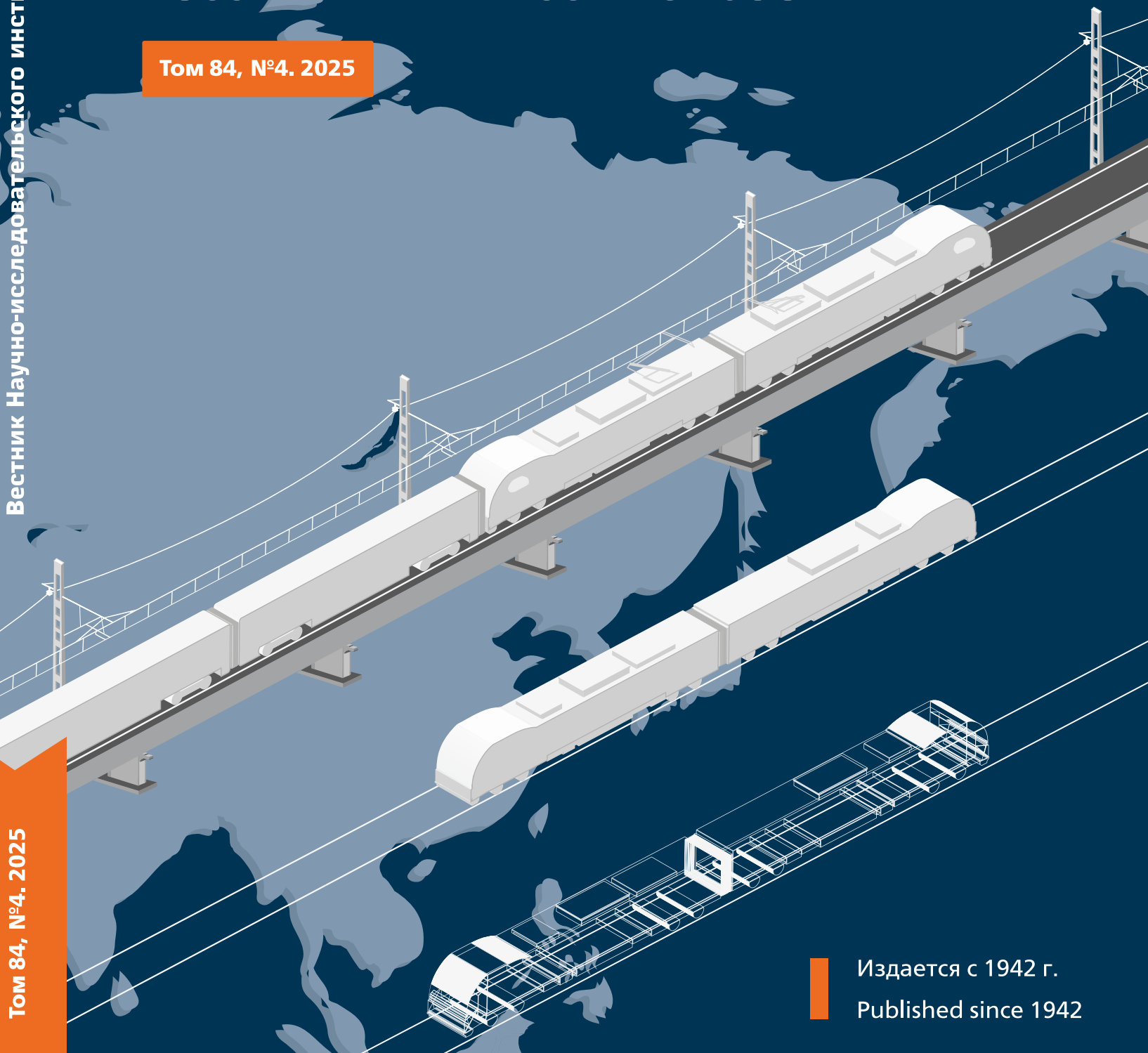


# ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

Том 84, №4. 2025

Том 84, №4. 2025

Издается с 1942 г.  
Published since 1942



## Глава РЖД Олег Белозёров ознакомился с новыми разработками для ВСМ на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»



Олег Белозёров отвечает на вопросы журналистов

**Олег Белозёров посетил ведущий испытательный полигон в стране — Экспериментальное кольцо Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта в г. Щербинка.**

В настоящее время на площадке института тестируют детали тормозной системы высокоскоростного поезда. Для этого российской компанией по техническому заданию ОАО «РЖД» создан единственный в стране инерционный тормозной стенд, который позволяет имитировать скорость движения до 450 км/ч. Одновременно можно «включить» ураганный ветер до 30 м/с, сибирский мороз  $-40^{\circ}\text{C}$  или тропическую жару  $+50^{\circ}\text{C}$ , а также осадки в виде снега или дождя.

Стенд позволяет проверить надежность деталей при температуре до  $500\text{--}800^{\circ}\text{C}$ , имитируя процесс торможения в экстремальных условиях, и затем провести оценку сохранности исходных свойств образцов изделия.

По мере изготовления производителями фрикционных элементов тормозной системы подвижного состава на стенде будут испытывать тормозные диски, установленные на осях и колесах, тормозные колодки, клещевые механизмы дисковых тормозов и др.

Олег Белозёров отметил: «Мы должны получить более 100 новых патентов и свидетельств, которые являются уникальными. Мы получим зарегистрированные права и в дальнейшем, я уверен, будем тиражировать наши наработки коллегам по всему миру». Глава РЖД подчеркнул, что на новый уровень сейчас выходит не только сборка, но и каждый элемент поезда. Над реализацией проекта работает более 150 предприятий.



Генеральный директор института Сергей Виноградов показывает Олегу Белозёрову пульт управления инерционным тормозным стендом

Также Олегу Белозёрову показали стендовые испытания плиты безбалластного основания стрелочного перевода будущей ВСМ. Вибрационный стенд позволяет осуществлять статическое и динамическое нагружение для имитации нагрузок в критических условиях эксплуатации. В рамках тестирования на опытный образец оказывают повышенное воздействие, до 25 тс/ось.



В цехе Экспериментального кольца

Управление и контроль за всеми ресурсными испытаниями осуществляется оператором из единого центра управления. Специалист составляет программы для гидродомкратов и пульсаторов, в которых прописаны нагрузки и интенсивность воздействия. Здесь же снимают все характеристики, полученные в ходе испытаний.

Фото: пресс-служба ОАО «РЖД»  
Текст: сайт ОАО «РЖД»



ISSN 2223-9731 (Print)

ISSN 2713-2560 (Online)

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-227-318>

# ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА (ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

## RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL (VESTNIK VNIIZhT)

TOM 84, № 4. 2025

Учредитель:  
АО «Научно-исследовательский  
институт железнодорожного транспорта»

Адрес учредителя и редакции:  
129626, Российская Федерация,  
Москва, 3-я Мытищинская ул., 10, стр. 1  
Тел.: +7 (495) 602-80-37, 602-81-10

Издается с 1942 г.  
Периодичность: 4 номера в год  
Подписной индекс: 70116  
Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-83067 от 11.04.2022

Отпечатано в типографии  
Индивидуального предпринимателя  
Копыльцова Павла Ивановича,  
394006, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, д. 27, кв. 56  
Тел.: + 7 (995) 494-84-77

Founder:  
Railway Research Institute

Founder and editorial address:  
Bldg 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St., Moscow, 129626,  
Russian Federation  
Tel.: +7 (495) 602 8037, 602 8110

Published since 1942  
Periodicity: Quarterly  
Subscription index: 70116  
Registration Certificate  
PI No. FS77-83067. 11.04.2022

Printed in the printing house  
of Individual Entrepreneur Pavel I. Kopyltsov,  
27, apt. 56, Marshala Nedelina St., Voronezh, 394052,  
Russian Federation  
Tel: + 7 (995) 494-84-77

[www.journal-vniizht.ru](http://www.journal-vniizht.ru)  
[journal@vniizht.ru](mailto:journal@vniizht.ru)

© АО «ВНИИЖТ», 2025

# ВЕСТНИК ВНИИЖТ

Цель журнала — публикация результатов передовых научных исследований в области совершенствования транспортных, информационных технологий и технических средств железнодорожного транспорта. Журнал адресован исследователям, аналитикам и практикам железнодорожной и машиностроительной отраслей, а также широкому кругу читателей, интересующихся проблемами развития железнодорожного транспорта.

Научный рецензируемый журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» публикует оригинальные научные статьи, ранее не публиковавшиеся в других изданиях.

Журнал предоставляет открытый доступ к полным текстам публикаций, исходя из следующего принципа: открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями.

«Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 2.5.2. Машиноведение (технические науки)
- 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)
- 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.17. Материаловедение (технические науки)
- 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки)
- 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки)
- 2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)

## ЖУРНАЛ ИНДЕКСИРУЕТСЯ И АРХИВИРУЕТСЯ В:

Едином государственном  
перечне научных изданий  
(«Белый список»)



Международной базе открытых  
публикаций **Google Академия**



Russian Science Citation Index (**RSCI**)



Международной  
электронно-библиотечной  
системе **The European Library**



Международной  
справочно-библиографической  
системе **EBSCO**



Электронном каталоге  
научно-технической литературы  
**ВИНИТИ РАН**



Китайской платформе  
наукометрических данных **Baidu**



Международной базе  
**Dimensions**



Китайской платформе  
наукометрических данных  
**China National Knowledge  
Infrastructure**



Директории журналов  
открытого доступа (**DOAJ**)



Международной реферативной  
базе **Ulrichsweb Global  
Serials Directory**



Агентстве регистрации  
цифровых идентификаторов  
(**CrossRef**)



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Право на оригинал-макет и оформление принадлежит учредителю журнала, авторское право на статьи — авторам



# RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

The aim is to publish the results of research insights in the field of improving transport and information technologies and technical means of railway transport. The journal is addressed to researchers, analysts and practitioners of the railway and engineering industries, as well as to a wide range of readers interested in the problems of railway transport development.

The scientific peer-reviewed Russian Railway Science Journal publishes original scientific articles, which have not been previously published.

The journal provides direct open access to full text issues — open access to research results contributes to the increase of global knowledge sharing.

The Russian Railway Science Journal is included in the List of peer-reviewed scientific journals published by the Attestation Commission in which major research results from dissertations of Candidate of Science and Doctor of Science degrees are to be published. Scientific specialties and corresponding branches of science are:

- 2.5.2. Machine science (technical sciences)
- 2.5.3. Friction and wear in machines (technical sciences)
- 2.6.1. Metal science and heat treatment of metals and alloys (technical sciences)
- 2.6.17. Materials science (technical sciences)
- 2.9.2. Railway track, survey and design of railways (technical sciences)
- 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification (technical sciences)
- 2.9.4. Transportation process management (technical sciences)

## THE JOURNAL IS INDEXED AND ARCHIVED IN:

Russian Centre for Science  
Information White List



Google Scholar



Russian Science Citation Index  
(RSCI)

Russian Science  
Citation Index

The European Library



EBSCO Information Services



Russian Institute for Scientific  
and Technical Information  
(VINITI RAS)



Baidu



Dimensions



China National Knowledge  
Infrastructure (CNKI)



Directory of Open Access Journals  
(DOAJ)



Ulrichsweb Global Serials  
Directory



Digital Object Identifier Registration  
Agency (CrossRef)



Journal materials are available under the Creative Commons Attribution 4.0 License



The right to the original layout and design belongs to the founder of the journal, the right of authorship to the articles belongs to the authors

## Главный редактор

**Косарев Александр Борисович**, д-р техн. наук, проф., научный руководитель института — научный секретарь, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

## Заместитель главного редактора

**Карасев Михаил Николаевич**, канд. юрид. наук, директор научно-образовательного центра, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 337912, <https://orcid.org/0009-0008-5190-409X>

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Абдурахманов Одил Каландарович**, д-р экон. наук, проф., ректор, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 813993, <https://orcid.org/0009-0008-8033-4153>

**Бессоненко Сергей Анатольевич**, д-р техн. наук, доцент, СГУПС, Новосибирск, Российская Федерация, Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

**Верескун Владимир Дмитриевич**, д-р техн. наук, проф., ректор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, Author ID: 513710, <https://orcid.org/0000-0002-9547-8167>

**Глюзберг Борис Эйнихович**, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

**Гуламов Абдулазиз Абдуллаевич**, д-р экон. наук, проф., проректор по учебной работе, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 583321, <https://orcid.org/0000-0002-4702-7468>

**Дунаев Олег Николаевич**, д-р экон. наук, проф., МГИМО, Москва, Российская Федерация, Author ID: 315899, <https://orcid.org/0000-0002-0593-1029>

**Ерофеев Михаил Николаевич**, д-р техн. наук, проф., ИМАШ РАН, Москва, Российская Федерация, Author ID: 836604, <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

**Захаров Сергей Михайлович**, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>

**Кудрявцев Сергей Анатольевич**, член-корреспондент РААСН, д-р техн. наук, проф., ДВГУПС, Хабаровск, Российская Федерация, Author ID: 614674, <https://orcid.org/0000-0001-9438-5033>

**Куммер Себастьян**, д-р экономики, проф., Венский экономический университет, Институт транспорта и логистики, Вена, Австрия, <https://orcid.org/0000-0002-4840-5256>

**Кучумов Владислав Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

**Ли Сюэй**, д-р наук, проф., Пекинский транспортный университет, Пекин, КНР

**Мирошниченко Ольга Федоровна**, д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 384947, <https://orcid.org/0000-0002-3049-5476>

**Науменко Сергей Николаевич**, д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 722006, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

**Овчаренко Сергей Михайлович**, д-р техн. наук, доцент, ректор, ОмГУПС, Омск, Российская Федерация, Author ID: 211825, <https://orcid.org/0000-0002-2985-3934>

**Савин Александр Владимирович**, д-р техн. наук, доцент, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 426312, <https://orcid.org/0000-0002-5561-5454>

**Сирина Нина Фридриховна**, д-р техн. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация, Author ID: 436265, <https://orcid.org/0000-0001-9691-5181>

**Федоров Сергей Васильевич**, д-р техн. наук, проф., КГТУ, Калининград, Российская Федерация, Author ID: 617155, <https://orcid.org/0000-0003-3104-9862>

**Шаумаров Саид Санатович**, д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе и инновациям, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 914211, <https://orcid.org/0000-0001-8935-7513>

**Шимановский Александр Олегович**, д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь, Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

**Шур Евгений Авелевич**, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 764128, <https://orcid.org/0000-0003-4248-195X>

**Эсвельд Конрад**, д-р техн. наук, проф. железнодорожной инженерии, Делфтский технологический университет, Делфт, Нидерланды

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Виноградов Сергей Александрович**, председатель, канд. техн. наук, генеральный директор АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

**Горячева Ирина Георгиевна**, д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, ИПМех РАН, Москва, Российская Федерация

**Дынькин Борис Евгеньевич**, д-р техн. наук, проф., почетный президент МАТУ АТР, ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Колесников Владимир Иванович**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Лапидус Борис Моисеевич**, д-р экон. наук, проф., председатель Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

**Махутов Николай Андреевич**, д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН, ИМАШ РАН, Москва, Российская Федерация

**Мачерет Дмитрий Александрович**, д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

**Мугинштейн Лев Александрович**, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

**Назаров Олег Николаевич**, канд. техн. наук, ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

**Розенберг Ефим Наумович**, д-р техн. наук, проф., первый заместитель генерального директора АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация

**Смолянинов Александр Васильевич**, д-р техн. наук, проф., УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация

## РЕДАКЦИЯ

**Анохов Игорь Васильевич**, начальник научно-издательского отдела,  
**Сиротенко Игорь Васильевич**, научный редактор,  
**Гиншпарг Михаил Маркусович**, научный редактор,  
**Редина Анна Эдуардовна**, редактор-корректор,  
**Сямина Александра Андреевна**, корректор,  
**Агафонова Наталия Сергеевна**, дизайнер-верстальщик

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются. Гонорары не выплачиваются. Все статьи публикуются бесплатно.

Подписано к печати 18.12.2025. Формат бумаги 60х90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 10,69. Тираж 200 экз. Заказ 72425. Цена свободная

## Editor-in-Chief

**Alexander B. Kosarev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Scientific Adviser — Scientific Secretary of the Railway Research  
Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 352781,  
<https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

## Deputy Editor-in-Chief

**Mikhail N. Karasev**, Cand. Sci. (Jur.), Director of the Science  
and Education Centre, Railway Research Institute, Moscow,  
Russian Federation, Author ID: 337912,  
<https://orcid.org/0009-0008-5190-409X>

## EDITORIAL BOARD

**Odil K. Abdurakhmanov**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Rector  
of the Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan,  
Author ID: 813993, <https://orcid.org/0009-0008-8033-4153>

**Sergey A. Bessonenko**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation,  
Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

**Vladimir D. Vereskun**, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Rector of the Rostov State Transport University,  
Rostov-on-Don, Russian Federation, Author ID: 513710,  
<https://orcid.org/0000-0002-9547-8167>

**Boris E. Glyzberg**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Railway Research  
Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 298472,  
<https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

**Abdulaziz A. Gulamov**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Vice Rector  
for Academic Affairs, Tashkent State Transport University,  
Tashkent, Uzbekistan, Author ID: 583321,  
<https://orcid.org/0000-0002-4702-7468>

**Oleg N. Dunaev**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Moscow State Institute  
of International Relations, Moscow, Russian Federation,  
Author ID: 315899, <https://orcid.org/0000-0002-0593-1029>

**Mikhail N. Erofeev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Mechanical  
Engineering Research Institute of the Russian Academy  
of Sciences, Moscow, Russian Federation, Author ID: 836604,  
<https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

**Sergey M. Zakharov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation,  
Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>

**Sergey A. Kudryavtsev**, Corresponding member of the Russian  
Academy of Architecture and Construction Sciences, Dr. Sci. (Eng.),  
Professor, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk,  
Russian Federation, Author ID: 614674,  
<https://orcid.org/0000-0001-9438-5033>

**Sebastian Kummer**, Dr. Sci. (Econ.), Professor,  
Vienna University of Economics and Business, Vienna, Austria,  
<https://orcid.org/0000-0002-4840-5256>

**Vladislav V. Kuchumov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation,  
Author ID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

**Li Xuwei**, Dr. Sci., Professor, Vice-President of the Engineering  
Union of China Transport System, Beijing Jiaotong University, China

**Olga F. Miroshnichenko**, Dr. Sci. (Econ.), Professor,  
Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation,  
Author ID: 384947, <https://orcid.org/0000-0002-3049-5476>

**Sergey N. Naumenko**, Dr. Sci. (Eng.), Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation, Author ID: 722006,  
<https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

**Sergey M. Ovcharenko**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Rector  
of the Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation,  
Author ID: 211825, <https://orcid.org/0000-0002-2985-3934>

**Alexander V. Savin**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation,  
Author ID: 426312, <https://orcid.org/0000-0002-5561-5454>

**Nina F. Sirina**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Ural State  
University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation,  
Author ID: 436265, <https://orcid.org/0000-0001-9691-5181>

**Sergey V. Fedorov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State  
Technical University, Kaliningrad, Russian Federation,  
Author ID: 617155, <https://orcid.org/0000-0003-3104-9862>

**Said S. Shaumarov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector for Research  
and Innovation, Tashkent State Transport University, Uzbekistan,  
Tashkent, Author ID: 914211, <https://orcid.org/0000-0001-8935-7513>

**Alexandr O. Shimanovsky**, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus,  
Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

**Evgeniy A. Schur**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research  
Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 764128,  
<https://orcid.org/0000-0003-4248-195X>

**Coenraad Esveld**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Delft Technical  
University, General Director of the "Esveld Consulting Services",  
Delft, Netherlands

## EDITORIAL COUNCIL

**Sergey A. Vinogradov**, Chairman, Cand. Sci. (Eng.), General Director  
of the Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation

**Irina G. Goryacheva**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor,  
Academician of the RAS, Institute for Problems in Mechanics  
of the Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

**Boris E. Dynkin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored President  
of the IATU APC, Platov South-Russian State Polytechnic University,  
Rostov-on-Don, Russian Federation

**Vladimir I. Kolesnikov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician  
of the Russian Academy of Sciences, Rostov State Transport  
University, Rostov-on-Don, Russian Federation

**Boris M. Lapidus**, Dr. Sci. (Econ.), Professor,  
Chairman of the Joint Scientific Council of the Russian Railways  
Company, Moscow, Russian Federation

**Nikolay A. Makhutov**, Dr. Sci. (Eng.),  
Professor, Corresponding Member

of the Russian Academy of Sciences, Moscow,  
Russian Federation

**Dmitriy A. Macheret**, Dr. Sci. (Econ.), Professor,  
Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation

**Lev A. Muginshtein**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research  
Institute, Moscow, Russian Federation

**Oleg N. Nazarov**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head  
of the Technical Policy Department, Russian Railways Company,  
Moscow, Russian Federation

**Efim N. Rosenberg**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, First Deputy  
General Director of the Research and Design Institute  
for Information Technology, Signalling and Telecommunications  
in Railway Transportation, Moscow, Russian Federation

**Alexander V. Smolyaninov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor  
of the Wagon Department, Ural State University of Railway  
Transport, Ekaterinburg, Russian Federation

## EDITORIAL STAFF

**Igor V. Anokhov**, Head of the Scientific Publishing Department,

**Igor V. Sirotenko**, Scientific Editor,

**Mikhail M. Ginshparg**, Scientific Editor,

**Anna E. Redina**, Editor-proofreader,

**Alexandra A. Syamina**, Proofreader,

**Nataliya S. Agafonova**, Layout Designer

Received materials are not returned. Fees are not paid. All articles are published free of charge.

Signed to print on 18.12.2025. Format is 60×90 1/8. Offset printing. 10.69 printed sheets. 200 copies. Order No. 72425. Free price

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

<b>Создание контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей</b> В. Е. Андреев, Е. В. Кудряшов.....	235–250
<b>Разработка модели определения разности потенциалов между рельсом и землей на участках электрифицированных железных дорог переменного тока</b> Е. Д. Винникова, А. Б. Косарев .....	251–261
<b>Прочность и устойчивость безбалластной конструкции верхнего строения бесстыкового пути высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург</b> А. В. Романов, А. А. Киселев.....	262–272
<b>Эффективность совместной работы устройств обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ и железнодорожной автоматики и телемеханики на грузонапряженных участках железных дорог</b> А. А. Крылов, А. Б. Косарев .....	273–286
<b>Процессы срыва и восстановления сцепления колес с рельсами электровоза переменного тока с управляемыми преобразователями возбуждения коллекторных тяговых двигателей</b> А. Н. Савоськин, А. А. Чучин .....	287–300

### УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

<b>Методика определения потребности развития региональной транспортно-логистической инфраструктуры</b> О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, Ю. С. Никонов .....	302–313
<b>Транспорт России: скорость, технологии и человек в центре внимания .....</b>	314–315
<b>Содержание журнала за 2025 год .....</b>	316–317

## CONTENTS

### TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

#### **Design and construction of the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways**

Vladimir E. Andreyev, Evgeny V. Kudryashov..... 235–250

#### **Model development for determining the potential difference between rail and ground on electrified AC railways sections**

Elena D. Vinnikova, Alexander B. Kosarev ..... 251–261

#### **Strength and stability of continuous welded rail track of ballastless track superstructure of Moscow – Saint Petersburg high-speed main line**

Andrei V. Romanov, Artyom A. Kiselev..... 262–272

#### **Efficiency of joint operation of 25 kV reverse traction AC network devices and railway automation and telemechanics on heavy-load railway sections**

Anton A. Krylov, Alexander B. Kosarev ..... 273–286

#### **Clutch failure and recovery processes of rail wheels of AC electric locomotive with controlled excitation converters of the collector traction motors**

Anatoliy N. Savos'kin, Anton A. Chuchin ..... 287–300

### TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

#### **Assessment of the sufficiency of regional transport and logistics infrastructure development**

Oleg V. Moskvichev, Elena E. Moskvicheva, Iurii S. Nikonov ..... 302–313

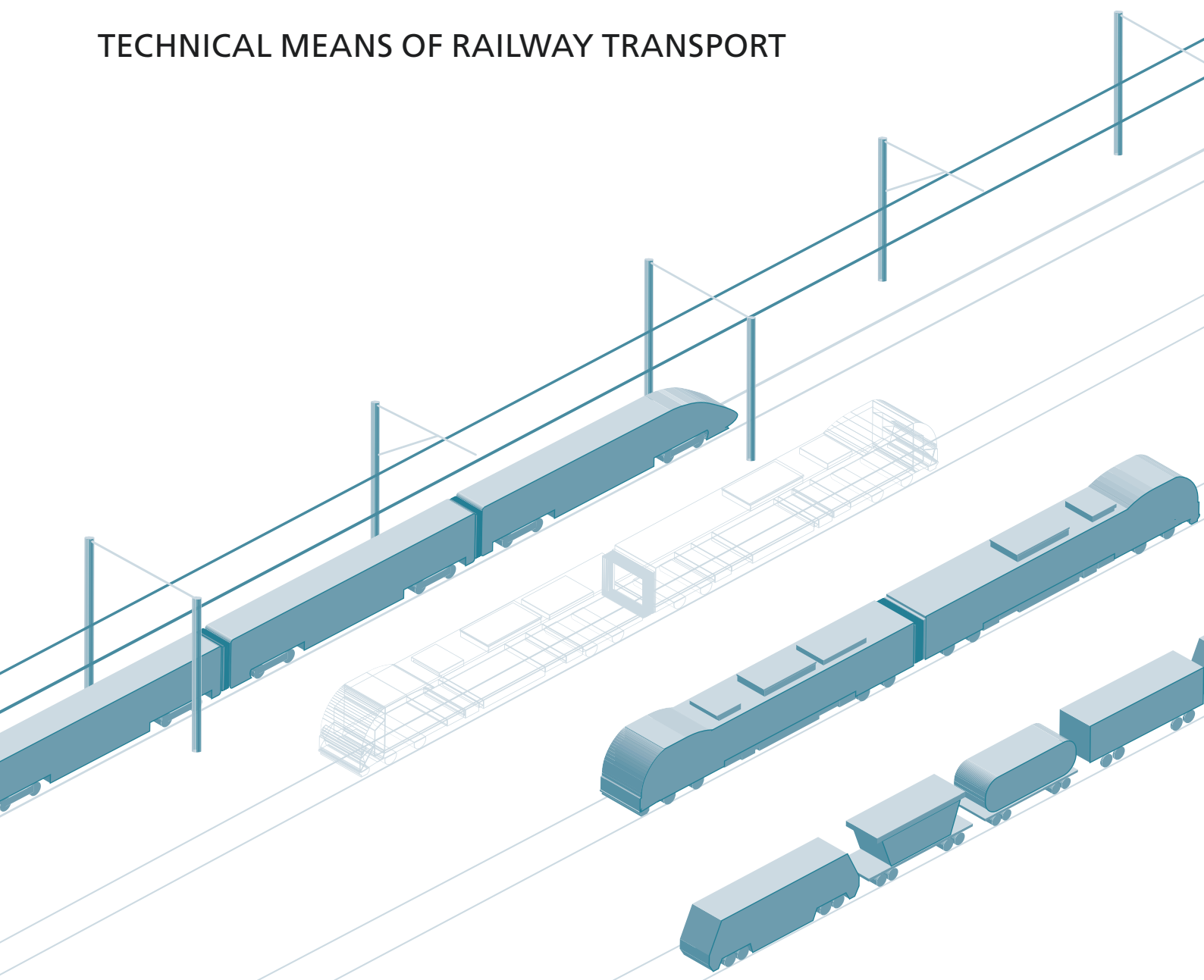
**Transport in Russia: speed, technology and human as a centre of attention** ..... 314–315

**Contents of the Journal for 2025** ..... 316–317



# ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT



## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 621.332.3

EDN: <https://elibrary.ru/dywrie>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-235-250>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



## Создание контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей

В. Е. Андреев<sup>1</sup>, Е. В. Кудряшов<sup>2</sup>✉<sup>1</sup>Департамент технической политики ОАО «РЖД» (ЦТЕХ),  
Москва, Российская Федерация<sup>2</sup>Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта (АО «ИЦ ЖТ»),  
Москва, Российская Федерация

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрены основные научно-технические проблемы, возникающие при создании контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей, и пути их решения на основе математического моделирования и поэтапных испытаний. При высоких скоростях движения возрастают токовые нагрузки и существенно усложняются условия динамического взаимодействия токоприемников и контактной подвески. Для достижения требуемого качества токосъема необходима тщательная проработка параметров взаимодействующих систем с учетом механических, электрических и тепловых процессов. Цель работы — обеспечить надежную работу узлов и конструкций контактной сети в широком диапазоне эксплуатационных условий.

**Материалы и методы.** При разработке технических решений по контактной сети использованы методы математического моделирования. Контактная сеть представлена детальной конечно-элементной моделью, токоприемник — моделью, построенной на основе методов многотельной динамики. Моделирование выполняется в пространственной нелинейной постановке задачи. Расчет динамики производится во временной области методом прямого интегрирования уравнений по времени. Контактная задача о взаимодействии контактной сети и токоприемника реализована методом штрафа. Подтверждение соответствия параметров контактной сети и ее отдельных элементов нормативным требованиям выполняется посредством механических, ресурсных, электрических, тепловых и других видов испытаний.

**Результаты.** Параметры узлов и конструкций контактной сети КС-400 определены по результатам математического моделирования. Показано, что показатели качества токосъема находятся в нормируемых пределах. Приведены особенности технических решений контактной сети КС-400, рассмотрены основные этапы ее разработки и сооружения.

**Обсуждение и заключение.** К настоящему времени выполнен значительный объем проектных, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных магистралей. Изготовлены опытные образцы изделий, построен опытный участок контактной сети на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ», выполняются необходимые испытания. Для подтверждения эксплуатационной совместимости КС-400 с другими подсистемами железной дороги и проверки показателей качества токосъема при взаимодействии с токоприемниками высокоскоростного электропоезда запланированы испытания на опытном полигоне Крюково – Новая Тверь на проектируемой высокоскоростной магистрали Москва – Санкт-Петербург.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железная дорога, высокоскоростная магистраль, контактная сеть, контактная подвеска, токоприемник, токосъем

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Андреев В. Е., Кудряшов Е. В. Создание контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 235–250. EDN: <https://elibrary.ru/dywrie>.

Original article

UDK 621.332.3

EDN: <https://elibrary.ru/dywrie>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-235-250>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



## Design and construction of the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways

Vladimir E. Andreyev<sup>1</sup>, Evgeny V. Kudryashov<sup>2</sup>✉<sup>1</sup>Technical Policy Department of JSC Russian Railways,  
Moscow, Russian Federation<sup>2</sup>Engineering Centre of Railway Transport,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The article examines the key scientific and technical problems arising at design and construction of the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways and presents their solutions based on the results of numerical simulations and stage-by-stage tests. At high train speed, electric current loads increase and dynamic interaction between pantographs and catenary becomes more complex. To provide a required quality of current collection, an extensive study of the parameters affecting mechanical, electrical and thermal processes in the pantograph-catenary interaction system must be carried out. The aim of the presented study is to ensure reliable operation of the overhead contact line assemblies and components in the wide range of operational conditions.

**Materials and methods.** Numerical simulation methods have been employed in the design of the KS-400 overhead contact line. The contact line is simulated with a detailed finite element model and the pantographs are modeled using multibody dynamics approach. Numerical models employ a three-dimensional nonlinear formulation. Dynamic problems are directly solved in the time domain by numerical integration of the system of finite element equations over time. Contact interaction between catenary and pantographs is modeled using the penalty method. The compliance of the overhead contact line parameters and the individual hardware components with regulatory requirements is confirmed by mechanical, electrical, thermal and other types of tests.

**Results.** The KS-400 overhead contact line assemblies and components have been designed based on the results of numerical simulation. It has been shown that the obtained indicators of current collection quality are within the allowable margins. The main technical solutions for the KS-400 overhead contact line and the key stages of its design and construction are presented in the article.

**Discussion and conclusion.** To date, large amount of design, research and development work on implementing the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways have been carried out. The prototype hardware components have been manufactured. A pilot overhead contact line section has been built at the Experimental Loop of the Railway Research Institute. The tests due are currently underway. In order to confirm operational compatibility of the KS-400 with other railway subsystems and to check the quality of current collection at high train speed, further field tests are scheduled at the Kryukovo – Novaya Tver experimental site which is a part of the designed Moscow – St. Petersburg high-speed railway.

**KEYWORDS:** railway, high-speed railway, overhead contact line, catenary, pantograph, current collection

**FOR CITATION:** Andreyev V. E., Kudryashov E. V. Design and construction of the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):235–250. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-235-250>.

✉ [eugeny.kudryashov@ecrt.ru](mailto:eugeny.kudryashov@ecrt.ru) (E. V. Kudryashov)

© Andreyev V. E., Kudryashov E. V., 2025

**Введение.** При проектировании и строительстве российских высокоскоростных железнодорожных магистралей (далее — ВСЖМ) одной из наиболее сложных и наукоемких проблем является создание системы токосъема — контактной сети и токоприемников, обеспечивающих высокую надежность и безотказность при передаче электрической энергии подвижному составу в широком диапазоне эксплуатационных условий при скоростях движения до 400 км/ч.

При высоких скоростях движения существенно усложняются условия динамического взаимодействия токоприемников и контактной подвески, возрастают токовые нагрузки [1]. Решающую роль начинают играть колебательные и волновые процессы в проводах контактной сети, а также аэродинамические воздействия на элементы токоприемника. Для обеспечения приемлемого качества токосъема необходима тщательная проработка параметров взаимодействующих систем с учетом механических, аэродинамических, электрических и тепловых процессов.

Технические решения для зарубежных высокоскоростных линий невозможно напрямую применить на контактной сети для ВСЖМ России. Это связано с необходимостью обеспечения расчетной скорости движения 400 км/ч (на подавляющем большинстве ВСЖМ в мире скорости движения не превышают 350 км/ч), существенно отличающимися климатическими условиями, необходимостью сохранить возможность пропуска подвижного состава габарита «Т», значительными отличиями от зарубежных аналогов других подсистем ВСЖМ, от которых зависят решения по контактной сети (подвижной состав, железнодорожный путь, искусственные сооружения, железнодорожная автоматика и телемеханика и др.), а также существенно более жесткими нормативными требованиями, действующими в Российской Федерации.

Основными научно-техническими проблемами при разработке контактной сети КС-400 для российских ВСЖМ являются:

- выбор параметров узлов и конструкций контактной сети, позволяющих обеспечить требуемое качество токосъема при скоростях движения до 400 км/ч;
- обеспечение передачи электрической энергии к движущимся высокоскоростным поездам с учетом повышенного энергопотребления при заданном уровне напряжения;
- обеспечение надежной работы контактной сети в широком диапазоне климатических условий, характерных для российских ВСЖМ, в том числе при гололедообразовании.

Цель работы — разработка и сооружение контактной сети для скоростей движения до 400 км/ч, обеспечивающей надежную работу в составе проектируемых в России высокоскоростных магистралей.

Создание контактной сети для ВСЖМ реализуется ОАО «РЖД» как комплексный научно-технический проект, результатами которого являются не только технические решения по узлам контактной сети, конструкторская и технологическая документация для производства изделий, опытные образцы, но и нормативная документация, технологии выполнения строительно-монтажных работ, а также регламенты по эксплуатации и техническому обслуживанию.

**Историческая справка.** Разработка контактной сети для высоких скоростей движения в России имеет свою многолетнюю историю. В 2001 г. была завершена реконструкция основной части магистрали Москва — Санкт-Петербург для повышения скоростей движения до 200 км/ч с монтажом новой (на тот момент) контактной сети КС-200 постоянного тока первого поколения, разработанной российскими специалистами. В 2005–2009 гг. на участке Калашниково — Лихославль Октябрьской железной дороги ОАО «РЖД» были проведены комплексные испытания контактной сети для скоростей движения до 250 км/ч, предназначенной для эксплуатации с электропоездами «Сапсан». По результатам испытаний были разработаны технические решения по контактной сети КС-200 и КС-250 второго поколения [2]. В 2008–2010 гг. выполнена адаптация инфраструктуры магистрали Москва — Санкт-Петербург для скоростей движения до 250 км/ч по новым проектам, а также реконструкция линии Санкт-Петербург — Бусловская для скоростей движения до 200 км/ч. В 2013–2014 гг. разработаны проекты КС-200 и КС-250 третьего поколения на основе развивающихся в России методов математического моделирования.

В 2015–2016 гг., на основе опыта эксплуатации контактной сети КС-200 и КС-250 и значительного объема дополнительных научных исследований, разработан первый проект технических решений по контактной сети КС-400 для участка Москва — Казань (ВСМ-2 Москва — Казань — Екатеринбург). Технические решения разработаны с учетом сложных условий эксплуатации ВСМ-2, не имеющих аналогов в мире: максимальная расчетная скорость движения поездов 400 км/ч, минимальная температура воздуха  $-50^{\circ}\text{C}$ , толщина стенки гололеда до 15 мм и др. [3].

Проект КС-400 для ВСМ-2 был разработан с учетом анализа зарубежного опыта проектирования, монтажа и эксплуатации контактной сети для высокоскоростных магистралей в Японии, Франции, Германии, Испании, Италии, Китае и Южной Кореи. Решения выполнены при тесном научно-техническом сотрудничестве с китайской компанией «Эр-Юань». Проект получил положительное экспертное заключение международного консультанта — французской компании SYSTRA и прошел Главгосэкспертизу России

в составе проектной документации по всем этапам проекта ВСМ-2 Москва – Казань.

В последние десятилетия ОАО «РЖД» выполнен большой объем работ в области технического регулирования и нормативного обеспечения проектирования, строительства и последующей эксплуатации ВСЖМ. В части контактной сети разработан ряд национальных и межгосударственных стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента Таможенного союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта»<sup>1</sup>. Сформированы специальные технические условия «Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1)»<sup>2</sup>, на основе которых разработан стандарт организации «Инфраструктура высокоскоростного железнодорожного транспорта. Технические нормы и требования к проектированию и строительству»<sup>3</sup>.

В 2020–2022 гг. под руководством ОАО «РЖД» разработан обновленный проект технических решений по контактной сети КС-400 для ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург с учетом изменений в российской и международной нормативной базе в период 2015–2022 гг., климатических особенностей трассы Москва – Санкт-Петербург, данных по другим подсистемам ВСЖМ-1, от которых зависят решения по контактной сети, а также требований по импортозамещению и локализации производства компонентов контактной сети в России. В отличие от проекта для ВСМ-2, этот проект предусматривает применение узлов и конструкций контактной сети российского производства.

Большинство изделий в составе контактной сети КС-400 для ВСЖМ-1 являются новыми по отношению к серийно применяемым для скоростей движения до 250 км/ч. При этом в условиях ВСЖМ изделия испытывают повышенные механические и электрические нагрузки и должны разрабатываться с учетом повышенных требований к надежности и ответственности. В 2023 г. ОАО «РЖД» приступило к выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию комплекса изделий контактной

сети для ВСЖМ-1 на основе проекта КС-400, а также — к разработке российского высокоскоростного токоприемника в составе электропоезда ЭВС360.

**Математическое моделирование контактной сети и процесса ее взаимодействия с токоприемниками.** В соответствии с мировым опытом для успешного создания высокоскоростных конструкций контактной сети и токоприемников используются специализированные математические модели системы токопитающего. В настоящее время в мире насчитывается не менее 14 подобных моделей — в том числе у крупнейших операторов железных дорог Deutsche Bahn [4], SNCF [5], фирм Siemens<sup>4</sup>, Alstom [6], Talgo [7], ведущих научных центров, таких как Шанхайский университет транспорта [8], Миланский политехнический университет [9] и др. В Европе имеется специальный стандарт EN 50318<sup>5</sup>, посвященный особенностям валидации данных моделей. Аналогичный стандарт действует в Китайской Народной Республике<sup>6</sup>. В 2011 г. на базе Политехнического университета Милана была организована кросс-валидация моделей взаимодействия контактной сети и токоприемников, используемых в разных странах. Проект занял 4 года, результаты кросс-валидации были опубликованы в 2015 г. [10] и явились основой для актуализации стандарта EN 50318 в 2018 г. В проекте участвовало 10 независимых моделей из 9 стран (Италия, Португалия, Испания, Франция, Германия, Швеция, Южная Корея, Япония, Китай).

В России детальные модели контактной подвески с распределенными параметрами ранее разрабатывались в Уральском и Омском государственных университетах путей сообщения [11, 12], а также компанией АО «Универсал — контактные сети» совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого [13]. Модели [13] и [12] использовались при разработке проектов КС-400 для ВСМ-2 и ВСЖМ-1, однако на текущий момент они отстали от передового мирового уровня и имеют серьезные ограничения. В частности, контактная сеть в данных моделях представлена только системой основных проводов — контактной подвеской. Опорные и поддерживающие конструкции, конструкции в анкерах, провода полевой стороны не моделируются.

<sup>1</sup> Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта»: принят решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710. М.: Центрмат, 2025. 112 с.

<sup>2</sup> Специальные технические условия. Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1). ФГБОУ ВО ПГУПС. 2023. 278 с.

<sup>3</sup> СТО РЖД 14.004-2025. Инфраструктура высокоскоростного железнодорожного транспорта. Технические нормы и требования к проектированию и строительству: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 04 апреля 2025 г. № 747/р. М.: ОАО «РЖД», 2025.

<sup>4</sup> Кислинг Ф., Пушманн Р., Шмидер А. Контактные сети электрифицированных железных дорог. М.: Сименс Россия, 2018. 1176 с.

<sup>5</sup> BS EN 50318:2018+A1:2022. Railway applications. Current collection systems. Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. BSI Standards Limited, 2022. 78 p.

<sup>6</sup> GB/T 32591-2016. Railway applications. Current collection systems. Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. Standards Press of China. Beijing, 2016.



Данные модели не позволяют определить требования к значительной части конструкций контактной сети и проверить работу всех изделий в едином комплексе.

Для дальнейших этапов создания контактной сети КС-400 на ВСЖМ-1, а также токоприемника ЛА-400 для ЭВС360 в 2023 г. ОАО «РЖД» было принято решение о разработке математической модели контактной сети и процесса ее взаимодействия с токоприемниками нового поколения. Соответствующая модель разработана и верифицирована под руководством Департамента технической политики ОАО «РЖД» специалистами АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта». Новая модель (рис. 1) имеет следующие основные особенности:

1. Моделируется не только контактная подвеска (система проводов), а вся контактная сеть с учетом опорных, поддерживающих, фиксирующих и других конструкций в единой системе, что позволяет, например, определять перемещения, нагрузки и механические напряжения во всех элементах контактной сети в различных расчетных режимах.

2. Модель позволяет гибко и с высокой степенью детализации моделировать различные участки контактной сети на перегонах и станциях с учетом широкого разнообразия возможных конструктивных и проектных

решений, включая сопряжения анкерных участков различных типов, воздушные стрелки, участки с разными длинами пролетов, участки на эстакадах и т. д. Для достижения требуемой гибкости используются методы цифрового информационного моделирования, объектно-ориентированный подход и сквозная параметризация.

3. Для численного моделирования контактная сеть представляется как стержневая система. Моделирование контактной сети выполняется методом конечных элементов в пространственной конструктивно и геометрически нелинейной постановке задачи. Провода и элементы конструкций контактной сети представлены конечными элементами растяжимого стержня Эйлера–Бернулли. Расчет динамики производится во временной области — прямым интегрированием уравнений по времени с учетом модели демпфирования по Рэлею. Контактная задача о взаимодействии контактной сети и токоприемника реализована методом штрафа: при возникновении в модели нефизической ситуации, когда полз токоприемника проникает сквозь конечный элемент контактного провода, к ползу и элементу провода прикладываются «штрафные» силы, моделирующие контактное нажатие и исправляющие возникшую ситуацию.

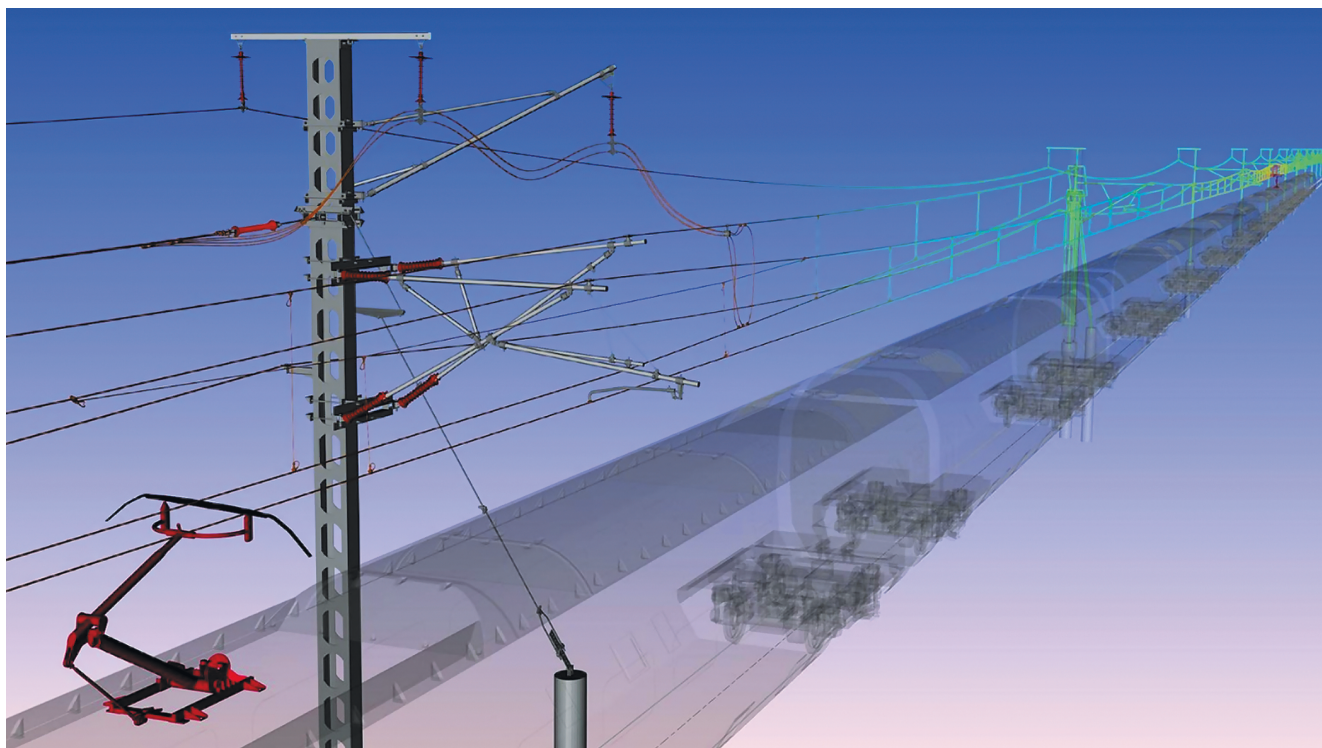


Рис. 1. Модель контактной сети КС-400 и токоприемника ЛА-400 на поезде ЭВС360 (фрагмент)\*

\* Источник: данные авторов

Fig. 1. Model of the KS-400 overhead contact line and LA-400 pantograph on the EVS360 train (fragment)\*

\* Source: authors' data

4. Расчетные модели токоприемников выполнены в нескольких вариантах: сосредоточенные модели с двумя, тремя и четырьмя степенями свободы, сложные многотельные модели, учитывающие реальную кинематику работы полоза, каретки и системы подвижных рам, а также их гибрид — комбинированная модель с детальным представлением полоза токоприемника и упрощенным представлением системы подвижных рам.

5. Учитываются влияния на контактную сеть и токоприемники климатических условий (изменение температуры, ветровые, гололедные, снеговые нагрузки), колебаний земляного полотна или пролетных строений эстакад, колебаний крыши подвижного состава, процессов износа контактного провода и контактных вставок токоприемников, а также аэродинамических воздействий.

6. Разработка компонентов модели выполнена на «низком уровне» — с описанием математических основ и имплементацией их на языках программирования, без применения внешних программных комплексов инженерного либо математического анализа.

Модель успешно верифицирована на основе решения множества проверочных задач, имеющих аналитическое решение или решение в сторонних сертифицированных системах инженерного анализа, на эталонных моделях контактной подвески и токоприемника согласно европейскому стандарту EN 50318 и национальному стандарту КНР GB/T 32591, а также на основе сравнения с результатами натурных испытаний, приведенными в стандарте EN 50318.

При разработке модели ставились цели снижения рисков принятия ошибочных технических решений при создании системы токосъема на ВСЖМ-1, оптимизации объема натурных испытаний, а также — снижения расходов на эксплуатацию контактной сети и токоприемников за счет выбора наиболее рациональных параметров этих систем.

Результаты моделирования позволили уточнить технические решения по контактной сети КС-400 и токоприемникам ЛА-400 высокоскоростного поезда ЭВС360, а также определить детальные технические требования к изделиям контактной сети КС-400 для дальнейшего выполнения опытно-конструкторских работ.

**Основные особенности технических решений контактной сети КС-400.** Контактная сеть спроектирована с учетом максимальной расчетной скорости движения электроподвижного состава 400 км/ч. При данной скорости, согласно расчетам и моделированию, все показатели качества токосъема, а также параметры надежности контактной сети должны оставаться в нормируемых пределах. Скорость 400 км/ч может быть достигнута при испытаниях подвижного состава

и инфраструктуры, при этом в регулярной эксплуатации ВСЖМ-1 максимальная скорость составит 360 км/ч (эксплуатационная скорость). Таким образом, в конструкции КС-400 заложен десятипроцентный запас надежности по скорости, который учитывает возможное несовершенство расчетных методов и положений нормативной документации, а также отклонение фактических параметров сооружения контактной сети от проектных значений.

Наибольшие скорости движения поездов будут реализованы на высокоскоростном участке ВСЖМ-1 с системой тягового электроснабжения переменного тока напряжением  $2 \times 25$  кВ. Входы в Москву и Санкт-Петербург электрифицируются по системе постоянного тока напряжением 3 кВ, скорость движения на данных участках не будет превышать 200 км/ч.

Технические решения по системе электроснабжения ВСЖМ-1 включают несколько типов контактной сети: КС-400 для главных путей высокоскоростного участка, КС-170 — для диспетчерских съездов и станционных путей, КС-220-3 и КС-170-3 — для участков постоянного тока. Эти контактные сети отличаются типами проводов и их натяжениями, схемой контактной подвески, но имеют унифицированные конструктивные решения по основным элементам.

Контактная подвеска для расчетной скорости 400 км/ч предусматривает применение контактного провода Бр3ФВ-150 сечением  $150 \text{ мм}^2$  с номинальным натяжением 33,7 кН из высокопрочной магниево-бронзы с временным сопротивлением при растяжении не менее 580 МПа. Для сравнения: натяжение контактных проводов в типовой контактной сети КС-160 составляет около 10 кН, в КС-200/КС-250 — 18–20 кН. В качестве несущих тросов контактной подвески применены тросы типа Бр2-120 с разрывным усилием не менее 71 кН при номинальном натяжении 27 кН (в типовых контактных сетях КС-160, КС-200, КС-250 соответствующее натяжение составляет 13,5–18,0 кН). Повышенные натяжения проводов позволяют обеспечить необходимую скорость распространения волны по контактной подвеске, повысить жесткость и снизить неравномерность эластичности контактной подвески, и в конечном итоге — достичь условия обеспечения надежного токосъема при скоростях движения до 400 км/ч, в том числе при двух рабочих токоприемниках на сдвоенном электропоезде ЭВС360 в 16-вагонном исполнении. Тип контактной подвески КС-400 — цепная компенсированная одинарная рессорная (для пролетов длиной 45 м и более). В подвеске применены токопроводящие струны мерной длины из гибких бронзовых тросов сечением  $10 \text{ мм}^2$ . Максимальная длина пролета контактной подвески на защищенных от ветра участ-

ках составляет 70 м. Номинальная высота подвеса контактного провода принята 5,8 м от уровня головки рельса (УГР).

В контактной подвеске КС-170 для диспетчерских съездов и станционных путей применяется несущий трос Бр1-120 и контактный провод Бр1Ф-120 с натя-

жениями 18 и 15 кН соответственно. Данные провода применяются в типовых контактных сетях КС-200 и КС-250.

Сравнение основных параметров контактных подвесок на некоторых зарубежных высокоскоростных магистралях с параметрами КС-400 приведено в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры контактных подвесок на высокоскоростных магистралях разных стран мира\*

Table 1

The main parameters of catenaries at high-speed railways in the world\*

Страна	Линия или тип контактной сети	Год открытия/год разработки линии	$V_{\text{эпс}}$ , км/ч	Тип контактной подвески <sup>1</sup>	$L_{\text{max}}$ , м	Тип проводов (материал и сечение, мм <sup>2</sup> ): НТ, КП	$T$ , кН, $K$ , кН	$V_C$ , км/ч ( $D_C$ , %)
Япония	Токайдо-Синкансэн (вариант <sup>2</sup> )	1960-е	210	Двойная нерессорная <sup>3</sup>	50	St-180 + Cu-150 Cu-170	25 + 15 15	393 (53 %)
	Синкансэн, различные линии (вариант <sup>2</sup> )	2000-е	300	Одинарная нерессорная	50	Cu-150 CuCrZr-110	19,6 19,6	469 (64 %)
Франция	LGV Paris Sud-Est	1981	260	Одинарная рессорная	63	BzII-65 Cu-120	14 15	481 (54 %)
	LGV Atlantique, LGV Rhône Alpes, LGV Nord	1989–1993	300	Одинарная нерессорная	63	BzII-65 Cu-150	14 20	483 (62 %)
	LGV Méditerranée	2001	320	Одинарная нерессорная	63	BzII-116 CuMg-150	20 25	497 (64 %)
	LGV Est Européenne, LGV Rhin-Rhône	2007–2011	350	Одинарная нерессорная	63	BzII-116 CuMg-150	20 26	503 (70 %)
Германия	Re 250	1991	280	Одинарная рессорная	65	BzII-70 CuAg-100	15 15	512 (55 %)
	Re 330	1992	330	Одинарная рессорная	65	BzII-120 CuMg-120	21 27	541 (61 %)
	SICAT H1.0	2002	350	Одинарная рессорная	70	BzII-120 CuMg-120	21 27	541 (65 %)
Испания	EAC-350 (Мадрид – Валенсия и др.)	2010	350	Одинарная рессорная	64	BzII-95 CuMg-150	15,5 31,5	528 (66 %)
Италия	Рим – Неаполь	2009	300	Одинарная нерессорная	60	Cu-120 CuMg-150	16,25 20	443 (68 %)
Китай	Пекин – Тяньцзинь	2008	350	Одинарная нерессорная	50	BzII-120 CuMg-120	21 27	541 (65 %)
	Чжэнчжоу – Сиань	2010	350	Одинарная рессорная	50	BzII-120 CuMg-150	23 28,5	528 (66 %)
	Ухань – Гуанчжоу	2010	350	Одинарная рессорная	60	BzII-120 CuMg-150	21 30	526 (67 %)
	Пекин – Шанхай	2011	380	Одинарная рессорная	60	BzII-120 CuCrZr-150	21 37	560 (68 %)
Россия	КС-400 ВСЖМ-1, проект	2025 (проект)	400	Одинарная рессорная	70	Бр2-120 Бр3ФВ-150	27 33,7	573 (70 %)

<sup>1</sup> Все приведенные в таблице контактные подвески — цепные компенсированные.

<sup>2</sup> В Японии отмечается большое разнообразие технических решений по контактной сети. Данные приведены для двух вариантов.

<sup>3</sup> Для двойной контактной подвески данные в строках по несущему тросу соответствуют суммарным параметрам несущего и вспомогательного тросов.

\* Источник: разработана авторами на основе анализа зарубежных технических решений

\* Source: authors' data based on the analysis of foreign technical solutions



В таблице приняты следующие обозначения:  $V_{\text{ЭПС}}$  — максимальная скорость движения;  $L_{\text{max}}$  — максимальная длина пролета;  $T$  — натяжение несущего троса (НТ);  $K$  — натяжение контактного провода (КП);  $V_C$  — скорость распространения волны по контактной подвеске;  $D_C$  — отношение скорости движения к скорости распространения волны. Материал проводов: St — сталь; Cu — медь; CuSn — бронзовый сплав медь-олово; CuAg — медь-серебро; CuMg — медь-магний; CuCrZr — медь-хром-цирконий; BzII — бронза второго типа по стандарту DIN 48201-2<sup>7</sup> или аналогичная. Для типовых российских контактных проводов и несущих тросов по ГОСТ Р 55647–2018<sup>8</sup> и ГОСТ 32697–2019<sup>9</sup> используются стандартные обозначения.

Как видно из табл. 1, на всех ВСЖМ мира отношение максимальной скорости движения к скорости распространения волны ( $D_C$ ) не превышает 70 %. Данное условие закреплено в ряде международных стандартов (например, IEC 60913:2024<sup>10</sup>) и является ключевым для обеспечения качества токосъема при высоких скоростях движения, что подтверждается также результатами моделирования. Для обеспечения указанного условия при скорости движения 400 км/ч в контактной сети КС-400 применены провода с наиболее высоким (по отношению к зарубежным аналогам) суммарным натяжением. Повышенные натяжения позволяют также увеличить максимальную длину пролета до 70 м (в большинстве зарубежных решений длина пролета не превышает 65 м). Тип контактной подвески (цепная компенсированная одинарная рессорная) соответствует решениям на большинстве ВСЖМ мира.

На рис. 2 приведена схема пролета контактной подвески КС-400 в пролете максимальной длины, график высотного положения контактного провода и распределение эластичности в пролете, рассчитанное на математической модели при контактном нажатии 200 Н, соответствующем скорости движения 400 км/ч. Для уменьшения неравномерности эластичности первые нерессорные струны контактной подвески отодвинуты от опор на максимальное расстояние: межструновые пролеты в опорном узле приняты 10 м, а в средней части пролета струны установлены с меньшими расстояниями.

Максимальная длина анкерного участка контактной подвески КС-400 составляет 1400 м. Неизолирующие сопряжения выполняются четырех- или пятипро-

летными. На эстакадах при малых длинах пролетов применяются сопряжения с большим числом пролетов. Изолирующие сопряжения, как правило, пятипролетные.

Воздушные стрелки по главным путям ВСЖМ-1 над стрелочными переводами 1/25 выполняются без пересечения контактных проводов с дополнительной третьей подвеской, что исключает боковой подхват токоприемником контактного провода примыкающего пути. При прохождении воздушной стрелки полоз токоприемника подхватывает контактный провод дополнительной (третьей) контактной подвески в верхней рабочей зоне, аналогично тому, как это происходит на сопряжениях. При движении по главному пути контактный провод подвески примыкающего пути вообще не взаимодействует с токоприемником. Это дает возможность использовать для примыкающих путей контактную подвеску КС-170 со сниженными натяжениями проводов, при этом в контактный провод этой подвески могут врезаться секционные изоляторы обычной конструкции. Такая воздушная стрелка ранее в России не применялась и является инновационным решением.

Параметры узлов контактной сети определены по результатам математического моделирования. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты моделирования динамического взаимодействия токоприемников ЛА-400 на поезде ЭВС360 с контактной подвеской КС-400 при прохождении пятипролетного неизолирующего сопряжения с пролетами максимальной длины 70 м на скорости 400 км/ч.

В табл. 2 и на рис. 4 для того же вычислительного эксперимента приведены показатели, используемые для оценки качества токосъема. Все нормируемые показатели у обоих токоприемников находятся в допустимых пределах, однако качество токосъема у второго по ходу движения токоприемника несколько хуже. Это связано с тем, что он работает в более сложных условиях: первый токоприемник возбуждает колебания и волны, которые распространяются по контактной подвеске и ухудшают условия работы второго токоприемника.

Технические решения КС-400 учитывают сложные климатические условия ВСЖМ-1 с расположением части трассы на эстакадах высотой до 30 м. Максимальная расчетная скорость ветра (с учетом локальных условий) принята 32,8 м/с, толщина стенки гололеда — до 22,5 мм. В сложных климатических условиях

<sup>7</sup> DIN 48201-2. Bronze stranded conductors. 1981. 2 p.

<sup>8</sup> ГОСТ Р 55647–2018. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 октября 2018 г. № 757-ст. М.: Стандартинформ, 2018. 18 с.

<sup>9</sup> ГОСТ 32697–2019. Тросы контактной сети железной дороги несущие. Технические условия: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 марта 2019 г. № 75-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

<sup>10</sup> IEC 60913:2024. Railway applications. Fixed installations. Electric traction overhead contact lines systems. 2024. 138 p.

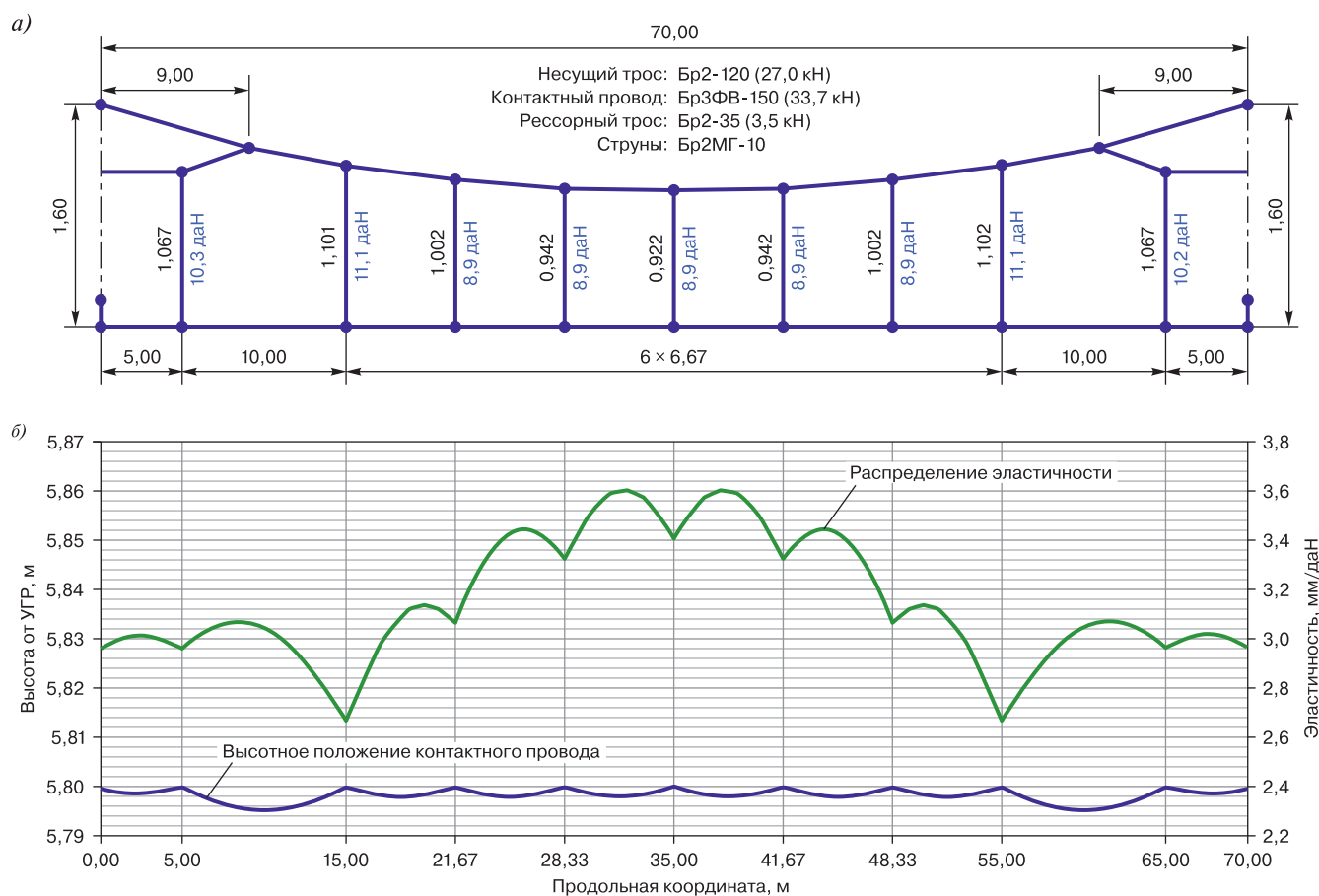


Рис. 2. Схема пролета контактной подвески КС-400 (а), графики распределения эластичности в пролете и высотного положения контактного провода (б)\*:

— распределение эластичности; — высотное положение контактного провода

\* Источник: данные авторов

Fig. 2. Scheme of the span of the KS-400 catenary (a), distribution of elasticity along the span and vertical position of the contact wire (b)\*:

— elasticity distribution ; — vertical position of the contact wire

\* Source: authors' data

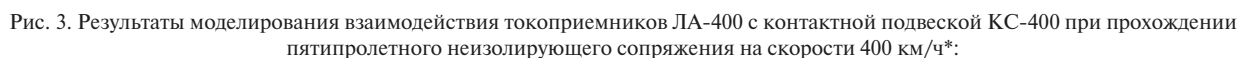
длины пролетов контактной подвески сокращаются. Температурный диапазон работы контактной сети составляет от  $-50^{\circ}\text{C}$  (абсолютная минимальная температура воздуха на части трассы) до  $+80^{\circ}\text{C}$  (максимальная рабочая температура проводов с учетом нагрева токами нагрузки и солнечной радиацией). Реализация высоких скоростей движения невозможна в условиях интенсивного гололедообразования. Для борьбы с гололедом предусмотрены схемы плавки и профилактического подогрева проводов. На сопряжениях анкерных участков и воздушных стрелках по ходу высокоскоростного движения предусматривается про-

плавление гололеда не только на контактном проводе в зоне взаимодействия с токоприемником (как это принято в технических решениях по контактной сети для обычных скоростей движения), но также и на несущем тросе контактной подвески, что позволяет избежать колебаний на проводах дополнительных масс гололедных образований и обеспечить необходимые условия динамического взаимодействия с токоприемниками при скоростях движения до 400 км/ч. Соответствующие решения отражены в патентах<sup>11, 12</sup> и на высокоскоростных магистралях реализуются впервые в мире.

<sup>11</sup> Патент № 2670942 Российская Федерация, МПК В60М 1/12, Н02Г 7/16. Устройство контактной подвески высокоскоростной магистрали: № 2017146590: заявл. 28.12.2017: опубл. 25.10.2018 / М. А. Артемов, Е. В. Кудряшов; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». EDN: <https://elibrary.ru/ojgbll>.

<sup>12</sup> Патент № 2668234 Российская Федерация, МПК Н02Г 7/16. Способ удаления гололеда с проводов контактной подвески высокоскоростной магистрали в зоне воздушной стрелки без пересечения проводов: № 2017146586: заявл. 28.12.2017: опубл. 27.09.2018 / М. А. Артемов, Е. В. Кудряшов; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». EDN: <https://elibrary.ru/wcfwvf>.





\* Источник: данные авторов

\* Source: authors' data

Table 2

Показатель	Норма	Значение для первого токоприемника	Значение для второго токоприемника
Среднее значение контактного нажатия $F_m$ , Н	—	202,8	206,0
Стандартное отклонение $\sigma$ , Н	$<0,3F_m$	37,8	56,7
Стандартное отклонение в полосе частот 0—5 Гц $\sigma_{0-5}$ , Н	—	23,6	44,2
Стандартное отклонение в полосе частот 5—20 Гц $\sigma_{5-20}$ , Н	—	28,9	34,4
Статистический максимум $F_m + 3\sigma$ , Н	$<450$	316,3	376,0
Статистический минимум $F_m - 3\sigma$ , Н	$>0$	89,3	36,1
Фактический максимум $F_{max}$ , Н	—	301,8	344,7

Окончание табл. 2

Показатель	Норма	Значение для первого токоприемника	Значение для второго токоприемника
Фактический минимум $F_{\min}$ , Н	—	96,6	52,1
Коэффициент асимметрии $s_k$	—	–0,05	–0,17
Коэффициент эксцесса $e_k$	—	–0,46	–0,54
Максимальное отжатие контактного провода под фиксатором $\Delta h_{\text{ф}}$ , мм	<150	109,4	115,0
Коэффициент искрения $K_{\text{и}}$ , %	<0,2	0,0	0,0
Удельное число искрений $N_{\text{иу}}$ , 1/км	—	0,0	0,0
Размах колебаний точки контакта $2A$ , мм	—	76,7	89,2

\* Источник: данные авторов

\* Source: authors' data

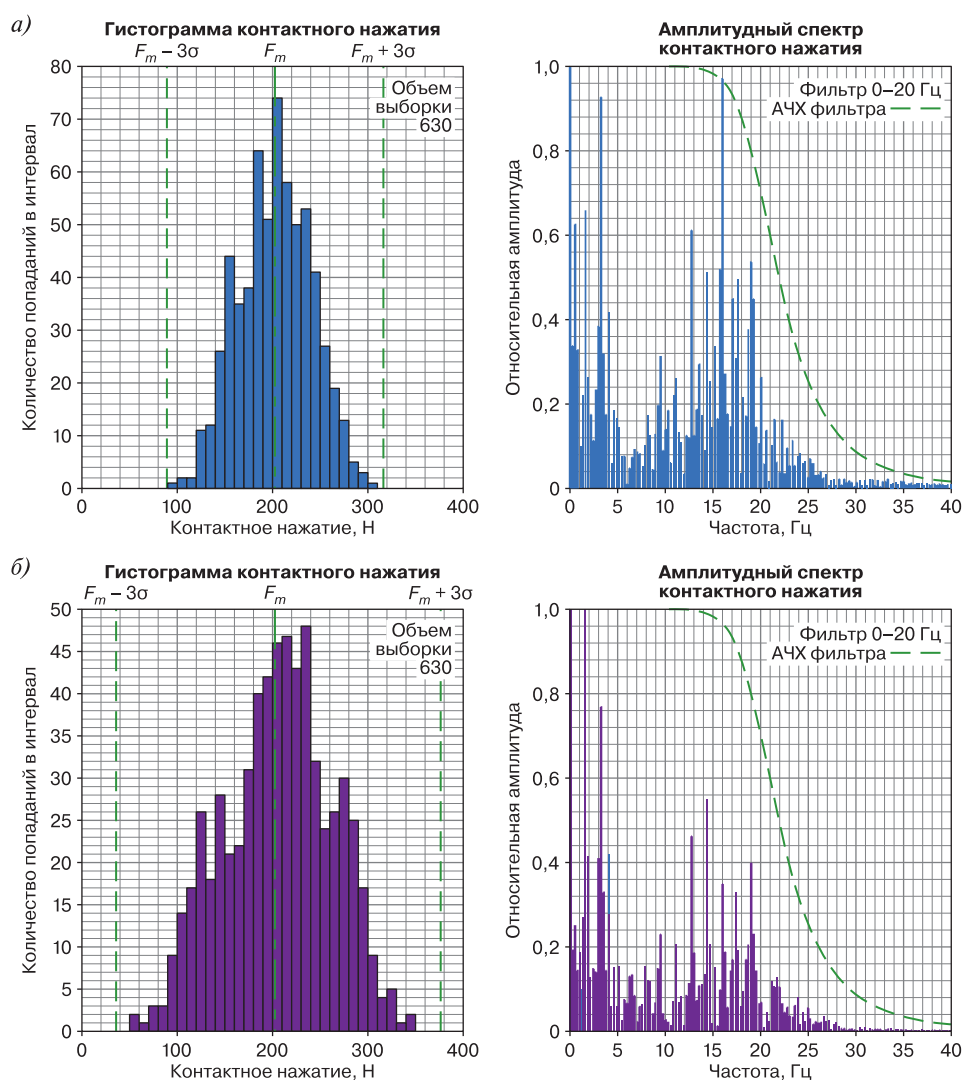


Рис. 4. Гистограмма и амплитудный спектр контактного нажатия\*:

а — первый токоприемник; б — второй токоприемник

\* Источник: данные авторов

Fig. 4. Histogram and amplitude spectrum of contact force\*:

a — first pantograph; б — second pantograph

\* Source: authors' data

В качестве фундаментов для опор контактной сети на высокоскоростном участке применяются буронабивные сваи. По сравнению с альтернативными решениями технология сооружения буронабивных свай оказывает наименьшее динамическое воздействие на земляное полотно и верхнее строение безбалластного пути ВСЖМ-1. На участках постоянного тока используются вибропогружаемые трехлучевые фундаменты. Аварийно-восстановительный вариант — металлические винтовые сваи. Стойки опор контактной сети — металлические двухшвеллерные. Для промежуточных опор используется облегченный вариант стоек с наклонными поясами. Конструкция стоек усилена с учетом повышенных нагрузок и требований высокоскоростного движения.

Кроме контактной подвески на опорах контактной сети подвешивается также питающий провод системы электроснабжения  $2 \times 25$  кВ и обратный провод, который выполняет, в том числе, функцию заземления опор контактной сети. С учетом особенностей конструкции земляного полотна ВСЖМ-1 габарит опор составляет 3,5 или 3,8 м, а заглубление обреза фундамента относительно уровня головки рельса — от 0,25 до 1,0 м. На эстакадах из-за особенностей конструкции пролетных строений габарит опор принят 3,1 м.

Компенсированные анкеровки контактной подвески приняты с барабанными компенсаторами, снабженными устройством защиты от падения грузов в аварийном режиме при обрыве компенсируемого провода. Такое решение позволяет уменьшить последствия возможных повреждений, связанных с обрывами проводов.

Консоли и фиксаторы контактной сети выполняются из алюминиевых труб. Консольная арматура имеет втулочную конструкцию и выполняется из алюминиевых сплавов методом точного литья. Дополнительные фиксаторы — трубчатые из алюминиевых сплавов. Конструкция дополнительных фиксаторов обеспечивает минимальную массу, передаваемую на контактный провод, и допустимое отжатие контактного провода при проходе токоприемником до 250 мм. При достижении максимального отжатия у фиксатора срабатывает специальный ограничитель подъема контактного провода. Шарнирные соединения консолей и фиксаторов по пути протекания тока между контактным проводом и несущим тросом электрически зашунтированы. Это позволяет избежать повреждения элементов арматуры в условиях вибрации при нагреве электрическим током. Электрически зашунтированная консоль фактически выполняет функцию поперечного электрического соединителя.

В контактной сети КС-400 применяется специализированная линейная арматура, обладающая повышенными механическими и электрическими характеристиками. Арматура, устанавливаемая на провода контактной подвески, оптимизирована по массе с целью улучшения динамических показателей контактной подвески при взаимодействии с токоприемниками.

Изоляторы — полимерные стержневые с цельнолитой кремнийорганической оболочкой в птицезащищенном исполнении. Длина пути тока утечки консольных, фиксаторных и подвесных изоляторов переменного тока увеличена и составляет 1,3 м, натяжных — 1,5 м.

Для контроля за параметрами контактной сети и выявления предотказных состояний предусматривается комплексная система технической диагностики и мониторинга, состоящая из стационарных устройств мониторинга, распределенных по линии, и мобильных диагностических комплексов.

Система заземления элементов инфраструктуры ВСЖМ-1 на высокоскоростном участке разработана с учетом применения обратного провода, который выполняет функцию пропуска обратного тока, организации контура заземления элементов инфраструктуры, снижения электрических потенциалов рельсов относительно земли, а также обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) тяговой сети ВСЖМ-1 с другими техническими средствами.

Обратный провод подключается к отсасывающим линиям тяговых подстанций, автотрансформаторных пунктов, а также к средним точкам дросселей рельсовой сети, устанавливаемых на расстоянии не более 1,5 км. В местах установки дросселей дополнительно устраиваются поперечные междупутные соединители. Обратный провод наглухо соединяется со стойками опор контактной сети. Металлические сооружения или их отдельные конструкции, расположенные в зоне А по ГОСТ Р 58321–2018<sup>13</sup> (по главным путям) и не находящиеся под напряжением, подлежат заземлению на обратный провод.

Для обеспечения проектных характеристик взаимодействия с токоприемниками при скоростях движения до 400 км/ч важным условием является высокоточная регулировка контактной подвески. Для этого применяется технология, предполагающая использование специализированных монтажных комплексов с раскаткой проводов под заданным натяжением и применение мерных струн контактной подвески (струн расчетной длины).

**Разработка комплекса изделий КС-400.** С 2023 года ОАО «РЖД» реализует системную опытно-конструк-

<sup>13</sup> ГОСТ Р 58321–2018. Электроустановки систем тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Требования к заземлению: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 декабря 2018 г. № 1119-ст. М.: Стандартинформ, 2018. 23 с.

торскую работу (ОКР) по разработке комплекса изделий КС-400, в рамках которой сформированы технические требования и технические задания к изделиям, выпущена конструкторская документация, изготовлены опытные образцы, выполняются предварительные, эксплуатационные и приемочные испытания, включающие различные виды механических, электрических, тепловых, ресурсных и других испытаний. Номенклатура изделий, из которых собирается контактная сеть КС-400, насчитывает более 800 позиций (с учетом исполнений). Изделия условно разбиты на номенклатурные группы: строительные конструкции, провода и тросы, узлы анкерровок, поддерживающие и фиксирующие конструкции, арматура и струны, изоляторы, оборудование, конструкции для заземления и обратной тяговой сети, стационарные устройства мониторинга. На момент написания настоящей статьи изготовлены опытные образцы типопредставителей изделий по всем позициям, успешно пройден этап предварительных

испытаний. Инновационные решения защищены патентами<sup>14, 15, 16</sup>.

**Испытания контактной сети КС-400.** Как было показано выше, конструкция контактной сети содержит множество инновационных технических решений — как по отношению к российским проектам КС-160, КС-200 и КС-250, так и к зарубежным аналогам. Подтверждение соответствия параметров контактной сети и ее отдельных элементов нормативным требованиям выполняется посредством поэтапных испытаний: отдельных изделий в рамках ОКР, контактной сети КС-400 в сборе как строительного сооружения, а также испытаний подвижного состава и инфраструктуры ВСЖМ-1, включающих испытания системы токосъема при проектных скоростях движения.

На текущий момент завершено строительство опытного полигона контактной сети КС-400 на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» (рис. 5) для проведения значительной части эксплуатационных и функциональных испытаний.



Рис. 5. Контактная сеть КС-400 на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»\*

\* Источник: фото авторов

Fig. 5. The KS-400 overhead contact line at the Experimental Loop of the Railway Research Institute\*

\* Source: photo by the authors

<sup>14</sup> Патент на полезную модель № 235571 U1 Российская Федерация, МПК В60М 1/26. Компенсатор натяжения провода контактной сети железной дороги: № 2025106201: заявл. 17.03.2025: опубл. 09.07.2025 / В.А. Бухаров, И.Д. Виноградов, Э.Д. Загитов, Е.В. Кудряшов, С.В. Якимов; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». EDN: <https://elibrary.ru/yuxfiz>.

<sup>15</sup> Патент № 2848837 Российская Федерация, МПК В60М 1/24. Фиксирующий зажим анкеруемого контактного провода контактной сети: № 2025106220: заявл. 17.03.2025: опубл. 21.10.2025 / В.А. Бухаров, И.Д. Виноградов, Э.Д. Загитов, Е.В. Кудряшов, С.П. Сердюк; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». EDN: <https://elibrary.ru/tweaux>.

<sup>16</sup> Патент на полезную модель № 235024 U1 Российская Федерация, МПК E02D 27/42. Трехлучевой фундамент для установки стойки опоры контактной сети: № 2025106210: заявл. 17.03.2025: опубл. 19.06.2025 / В.А. Бухаров, И.Д. Виноградов, Э.Д. Загитов, Е.В. Кудряшов, А.А. Прямыцын; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». EDN: <https://elibrary.ru/dgmutk>.



Целями проведения испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» являются:

- установление функциональной совместимости, собираемости комплекса изделий и узлов контактной сети КС-400;
- оценка результатов технологических процессов сооружения опорных, поддерживающих и фиксирующих конструкций, узлов анкеровки и других элементов контактной сети;
- оценка результатов выполнения технологических процессов раскатки проводов контактной сети и высокоточной регулировки контактной подвески;
- подтверждение соответствия контактной сети КС-400 и ее элементов требованиям межгосударственных и национальных стандартов, СТО РЖД 14.004-2025<sup>17</sup>, техническим требованиям к изделиям контактной сети КС-400, а также требованиям проекта технических решений КС-400;
- оценка функциональной пригодности контактной сети КС-400 и ее элементов (изделий) для последующей эксплуатации на ВСЖМ-1 при скоростях движения до 400 км/ч по совокупности конструктивных, технологических, геометрических, статических, динамических и других показателей (за исключением показателей качества токосъема и условий взаимодействия контактной сети КС-400 с другими подсистемами ВСЖМ-1, которые должны оцениваться при реализации соответствующих скоростей движения на специальном испытательном полигоне);
- проверка работоспособности конструкций и узлов контактной сети (включая средние анкеровки, сопряжения анкерных участков и воздушные стрелки) при взаимодействии с токоприемником с имитацией повышенного контактного нажатия, характерного для скоростей движения до 400 км/ч;
- оценка механической прочности и подтверждение коэффициента безопасности для основных конструкций контактной сети в сборе, а именно: фундаментов и анкерных буронабивных свай, стоек опор, поддерживающих конструкций, а также изделий в силовой цепи повышенного натяжения проводов контактной подвески;
- оценка последствий работы контактной сети в аварийных режимах (обрыв контактного провода, повышение натяжения проводов вследствие возможного заклинивания компенсаторов);
- оценка результатов выполнения технологических процессов восстановления контактной сети после аварийных сценариев;
- валидация математической модели контактной сети на основе экспериментальных данных;

- получение массива экспериментальных данных для разработки и актуализации нормативной, технической, технологической и эксплуатационной документации по контактной сети высокоскоростных магистралей.

Для подтверждения эксплуатационной совместимости КС-400 с другими подсистемами железной дороги и проверки показателей качества токосъема при взаимодействии с токоприемниками высокоскоростного электропоезда запланированы испытания на опытном полигоне Крюково – Новая Тверь, являющемся частью проектируемой линии ВСЖМ-1.

**Обсуждение и заключение.** К настоящему времени выполнен значительный объем проектных, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных магистралей. Разработаны технические решения, выпущена конструкторская документация, изготовлены опытные образцы изделий контактной сети, смонтирован опытный участок на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

Для обеспечения качества токосъема при скоростях движения до 400 км/ч в контактной подвеске применены провода из высокопрочной магниевой бронзы с повышенным натяжением. Параметры узлов и конструкций определены на основе математического моделирования контактной сети и процесса ее динамического взаимодействия с токоприемниками. По результатам моделирования выбрана наиболее рациональная схема контактной подвески и параметры ее основных узлов: сопряжений анкерных участков, средних анкеровок, воздушных стрелок и др.

Передача электроэнергии к высокоскоростным поездам с учетом повышенного энергопотребления обеспечена за счет применения системы электроснабжения  $2 \times 25$  кВ с обратным проводом, повышенного сечения контактного провода ( $150 \text{ мм}^2$ ), а также токопроводящих струн контактной подвески.

Для обеспечения надежной работы контактной сети в условиях гололеда применены схемы плавки гололеда и профилактического подогрева проводов. Параметры узлов и конструкций рассчитаны с учетом работы контактной сети в широком диапазоне климатических условий, характерных для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Ближайшими задачами проекта по созданию контактной сети КС-400 для отечественных ВСЖМ являются:

1. Проведение эксплуатационных и функциональных испытаний контактной сети КС-400 на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

<sup>17</sup> СТО РЖД 14.004-2025. Инфраструктура высокоскоростного железнодорожного транспорта. Технические нормы и требования к проектированию и строительству.



2. Проведение приемочных испытаний комплекса изделий КС-400.

3. Освоение серийного производства комплекса изделий КС-400.

4. Сертификация продукции.

5. Завершение разработки проектной документации для строительства высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1).

6. Строительство опытного полигона Крюково – Новая Тверь для испытаний инфраструктуры и подвижного состава ВСЖМ-1.

7. Испытания контактной сети КС-400 и системы токосъема с реализацией скоростей движения до 400 км/ч на опытном полигоне Крюково – Новая Тверь. Проверка условий взаимодействия контактной сети с другими элементами инфраструктуры ВСЖМ-1. Опытная эксплуатация.

8. Актуализация нормативной, технической, технологической и эксплуатационной документации по результатам испытаний.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

**Acknowledgments:** the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Funding:** the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бурков А. Т., Сероносов В. В., Кудряшов Е. В., Степанская О. А. Физические основы проектирования электротяговых сетей высокоскоростных железнодорожных магистралей // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 2 (57). С. 36–41. EDN: <https://elibrary.ru/twphab>.

Burkov A. T., Seronov V. V., Kudryashov E. V., Stepankaya O. A. Principal physics for designing electric traction networks for high-speed railways. *Transport of the Russian Federation*. 2015;2(57):36–41. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/twphab>.

2. Хананов В. В., Попов С. В., Кудряшов Е. В., Чередников Д. И., Бухаров В. А. Схемные решения и варианты конструкций контактной сети на экспериментальном участке Калашниково – Лихославль // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе. Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2010. С. 19–32.

Khananov V. V., Popov S. V., Kudryashov E. V., Cherednikov D. I., Bukharov V. A. Engineering solutions and design variants for overhead

contact line on the experimental section Kalashnikovo – Likhoslavl. *Current collection and traction power supply for high-speed traffic at a direct current. Coll. of sci. papers of JSC VNIIZHT (Railway Research Institute)*. Moscow: Intext, 2010. P. 19–32. (In Russ.).

3. Балабанов Г. Н., Кудряшов Е. В., Артемов М. А., Кашкин Н. В. Технические решения по контактной сети высокоскоростной магистрали Москва – Казань // Железнодорожный транспорт. 2018. № 6. С. 27–33. EDN: <https://elibrary.ru/xpuibf>.

Balabanov G. N., Kudryashov E. V., Artemov M. A., Kashkin N. V. Technical solutions for overhead contact line of high-speed railway Moscow – Kazan. *Railway Transport*. 2018;(6):27–33. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xpuibf>.

4. Finner L., Poetsch G., Sarnes B., Kolbe M. Program for catenary-pantograph analysis, ProSA statement of methods and validation according EN 50318. *Vehicle System Dynamics*. 2015;3(53):305–313. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.958501>.

5. Massat J.-P., Balmes E., Bianchi J.-Ph., Van Kalsbeek G. OSCAR statement of methods. *Vehicle System Dynamics*. 2015;3(53):370–379. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1005016>.

6. Oumri M., Leouatni M., Chentouf S.-A., Rachid A. INPAC a new simulation tool for the prediction of dynamic interaction between the pantograph & the catenary. *International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*. April 2016. Paper 0123456789. URL: [https://www.researchgate.net/publication/317091290\\_INPAC\\_a\\_new\\_simulation\\_tool\\_for\\_the\\_prediction\\_of\\_dynamic\\_interaction\\_between\\_the\\_pantograph\\_the\\_catenary](https://www.researchgate.net/publication/317091290_INPAC_a_new_simulation_tool_for_the_prediction_of_dynamic_interaction_between_the_pantograph_the_catenary) (access date: 19.09.2025).

7. Tur M., Baeza L., Fuenmayor F. J., García E. PACDIN statement of methods. *Vehicle Systems Dynamics*. 2015;3(53):402–411. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.963126>.

8. Zhou N., Lv Q., Yang Y., Zhang W. <TPL-PCRUN> Statement of methods. *Vehicle Systems Dynamics*. 2015;3(53):380–391. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.982136>.

9. Collina A., Bruni S., Facchinetti A., Zuin A. PCaDA statement of methods. *Vehicle Systems Dynamics*. 2015;3(53):347–356. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.959027>.

10. Bruni S., Ambrosio J., Carnicero A. et al. The results of the pantograph–catenary interaction benchmark. *Vehicle Systems Dynamics*. 2015;3(53):412–435. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.953183>.

11. Паранин А. В., Ефимов Д. А., Батрашов А. Б. Взаимодействие токоприемника высокоскоростного подвижного состава и контактной подвески в различных условиях эксплуатации // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 94–99. EDN: <https://elibrary.ru/tqlfyg>.

Paranin A. V., Efimov D. A., Batrashov A. B. Interaction of current collector of high-speed rolling stock and catenary suspension in various conditions of operation. *Transport of the Urals*. 2022;3(74):94–99. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tqlfyg>.

12. Смердин А. Н., Голубков А. С., Жданов В. А. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвеске на основе конечно-элементной модели // Известия Транссиба. 2011. № 1 (5). С. 30–37. EDN: <https://elibrary.ru/ndyuer>.

Smerdin A. N., Golubkov A. S., Zhdanov V. A. Improvement of wave process research methodology in overhead contact line based on finite element model. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2011;1(5):30–37. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ndyuer>.

13. Григорьев Б. С., Головин О. А., Викторов Е. Д., Кудряшов Е. В. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железных дорог // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2012. № 4 (159). С. 155–162. EDN: <https://elibrary.ru/plukbh>.

Grigoryev B. S., Golovin O. A., Viktorov E. D., Kudryashov E. V. Numerical simulation of mechanical interaction of pantographs and catenary line for high-speed electrified railways. *St. Petersburg Polytechnic University Journal*. 2012;4(159):155–162. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/plukbh>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Владимир Евгеньевич АНДРЕЕВ,**

канд. техн. наук, начальник Департамента технической политики ОАО «РЖД» (ЦТЕХ, 107174, Россия, г. Москва, Новая Басманная ул., 2/1, стр. 1), Author ID: 1045354, <https://orcid.org/0009-0006-4059-9654>

### **Евгений Владимирович КУДРЯШОВ,**

канд. техн. наук, начальник отдела моделирования контактных сетей, АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта» (АО «ИЦ ЖТ», 121205, г. Москва, инновационный центр Сколково, Большой бул., д. 40), SPIN-код: 3841-3064, <https://orcid.org/0009-0004-8527-1770>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Vladimir E. ANDREYEV,**

Cand. Sci. (Eng), Head of Technical Policy Department of JSC Russian Railways (107174, Moscow, bldg. 1, 2/1, Novaya Basmannaya St.), Author ID: 1045354, <https://orcid.org/0009-0006-4059-9654>

### **Evgeny V. KUDRYASHOV,**

Cand. Sci. (Eng), Head of Overhead Contact Lines Simulation Department, JSC "Engineering Center of Railway Transport" (121205, Moscow, Skolkovo Innovation Centre, 40, Bolshoi Blvd.), SPIN-code: 3841-3064, <https://orcid.org/0009-0004-8527-1770>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Владимир Евгеньевич АНДРЕЕВ.** Постановка целей и задач, общее руководство исследованием, разработка разделов «Введение», «Историческая справка», «Разработка комплекса изделий КС-400», «Испытания контактной сети КС-400», редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

**Евгений Владимирович КУДРЯШОВ.** Математическое моделирование, разработка разделов «Математическое моделирование контактной сети и процесса ее взаимодействия с токоприемниками», «Основные особенности технических решений контактной сети КС-400», подготовка рисунков, редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Vladimir E. ANDREYEV.** Setting goals and objectives, general management of the research, development of the sections "Introduction", "Historical background", "Development of a set of hardware components for the KS-400", "KS-400 catenary system testing", editing and article text preparation (50 %).

**Evgeny V. KUDRYASHOV.** Numerical simulation, development of sections "Numerical simulation of the catenary system and its interaction with pantographs", "Main features of technical solutions of KS-400 catenary system", figure preparation, editing and article text preparation (50 %).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию 09.10.2025, рецензия от первого рецензента получена 16.10.2025, рецензия от второго рецензента получена 20.10.2025, принята к публикации 07.11.2025.

The article was submitted 09.10.2025, first review received 16.10.2025, second review received 20.10.2025, accepted for publication 07.11.2025.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 621.316.13:625.141

EDN: <https://elibrary.ru/cxyfvu>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-251-261>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



## Разработка модели определения разности потенциалов между рельсом и землей на участках электрифицированных железных дорог переменного тока

Е. Д. Винникова✉, А. Б. Косарев

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Активное применение геосинтетических материалов при модернизации железнодорожного пути для повышения его механической стабильности приводит к значительному увеличению электрического сопротивления балластного слоя. Это создает серьезную проблему для электрифицированных железных дорог переменного тока, так как нарушает нормальное растекание обратных тяговых токов и приводит к возникновению опасных разностей потенциалов между рельсом и землей. Целью исследования является разработка и верификация физико-математической модели определения разности потенциалов между рельсом и землей на участках электрифицированных железных дорог переменного тока для количественной оценки потенциала и анализа влияния структуры балластной призмы на его распределение.

**Материалы и методы.** Для решения задачи была разработана уточненная физико-математическая модель на основе метода конечных элементов. Данный метод позволяет учесть пространственную неоднородность электрических параметров пути. Модель интегрирует сопротивления различных элементов конструкции пути: рельсов, шпал, балласта и земляного полотна. Для валидации модели были проведены натурные эксперименты на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

**Результаты.** Экспериментальные исследования подтвердили адекватность разработанной модели. Результаты расчетов продемонстрировали высокую степень соответствия с данными натурных измерений распределения потенциала вдоль пути. В результате проведенной работы создан инструмент для решения прикладных задач, связанных с определением разности потенциалов между рельсом и землей.

**Обсуждение и заключение.** Сравнение опытных и расчетных данных уточненной физико-математической модели показывает, что разработанная модель является эффективным инструментом для прогнозирования потенциально опасных участков на этапе проектирования верхнего строения пути.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электрифицированные железные дороги, тяговое электроснабжение, разность потенциалов между рельсом и землей, сопротивление балласта, обратный тяговый ток, физико-математическая модель

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Винникова Е. Д., Косарев А. Б. Разработка модели определения разности потенциалов между рельсом и землей на участках электрифицированных железных дорог переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 251–261. EDN: <https://elibrary.ru/cxyfvu>.

Original article

UDK 621.316.13:625.141

EDN: <https://elibrary.ru/cxyfvu>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-251-261>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



## Model development for determining the potential difference between rail and ground on electrified AC railways sections

Elena D. Vinnikova✉, Alexander B. Kosarev

Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The active use of geosynthetic materials in the modernisation of railway track in order to enhance its mechanical stability leads to a significant increase in the electrical ballast layer resistance. This presents challenge for electrified AC railways, as it disrupts the normal flow of reverse traction currents and leads to dangerous potential differences between the rail and the ground. The aim of the study is to develop and verify a physical-mathematical model for the assessment of potential difference between the rail and the ground on electrified AC railways sections for a quantitative assessment of rail potential and analysis of the effect of the ballast prism structure on its distribution.

**Materials and methods.** In order to solve the problem, the authors developed a refined physical-mathematical model based on the finite element method, which allows to consider the spatial heterogeneity of the electrical parameters of the pipe. The model integrates the resistance of various structural elements of the track: rails, sleepers, ballast and road-bed. Field experiments were conducted on the Experimental Loop of the Railway Research Institute to validate the model.

**Results.** Experimental studies confirmed the adequacy of the developed model. The calculation results demonstrated a high degree of consistency with the field measurements data of the potential distribution along the way. As a result of the work carried out, a tool has been created for solving applied problems related to determining the potential difference between the rail and the ground.

**Discussion and conclusion.** Comparison of the experimental and calculated data of the refined physical-mathematical model shows that the developed model is presented as an effective tool for predicting potentially dangerous sections at the ballastless track superstructure design.

**KEYWORDS:** electrified railways, traction power supply, potential difference between rail and ground, ballast resistance, reverse traction current, physical-mathematical model

**FOR CITATION:** Vinnikova E.D., Kosarev A.B. Model development for determining the potential difference between rail and ground on electrified AC railways sections. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):251–261. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-251-261>.

**Введение.** В соответствии со стратегией развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года<sup>1</sup> одной из ключевых задач повышения надежности и эффективности эксплуатации железнодорожной инфраструктуры является модернизация железнодорожного пути на наиболее грузонапряженных направлениях. Для достижения этой цели за последние годы были выполнены значительные работы по усилению и совершенствованию путевого хозяйства, разработаны современные технологические и инновационные решения, направленные на увеличение пропускных и провозных способностей железных дорог.

Усиление искусственных сооружений и земляного полотна является одним из основных направлений развития и совершенствования путевого хозяйства. При восстановлении и строительстве железнодорожных путей для увеличения устойчивости и прочности грунтов, а также снижения деформации земляного полотна применяют геосинтетические материалы, например геотекстиль. Применение геосинтетических материалов в качестве разделительного слоя конструкции железнодорожного пути является типовым решением в соответствии с технологическими процессами на производство ремонтов<sup>2</sup> (рис. 1).

К геосинтетическим материалам применяются требования по стойкости к вредным воздействиям, прочности и деформативности, гидравлическим и теплофизическим характеристикам, геометрическим размерам и весу элементов. При этом нормирование их электри-

ческих характеристик не осуществляется, и в технических характеристиках материалов обычно эта информация не указывается [1], в то же время данный материал, как правило, обладает высоким электрическим сопротивлением. Это особенно важно для электрифицированных железнодорожных участков, где электрическое сопротивление используемых материалов может привести к изменению распределения обратных тяговых токов и возникновению опасных разностей потенциалов между рельсом и землей.

Проблеме моделирования распределения потенциалов вдоль железнодорожного пути посвящен ряд научных работ. Традиционные подходы, основанные на теории однородных длинных линий [2–4], хорошо зарекомендовали себя для расчета усредненных параметров на протяженных участках. Однако, как показано в [5, 6], одной из характеристик рельсовой сети является пространственная неоднородность ее параметров, которая обусловлена использованием различных материалов в структуре балластной призмы, использованием различных типов рельсовых скреплений и другими факторами.

В работе [7] подтверждено влияние геосинтетических материалов на сопротивление балласта, но не предложено расчетной методики. Исследования [8, 9] рассматривают отдельные аспекты проблемы, не содержат комплексной модели, учитывающей пространственное изменение электрических параметров железнодорожного полотна.

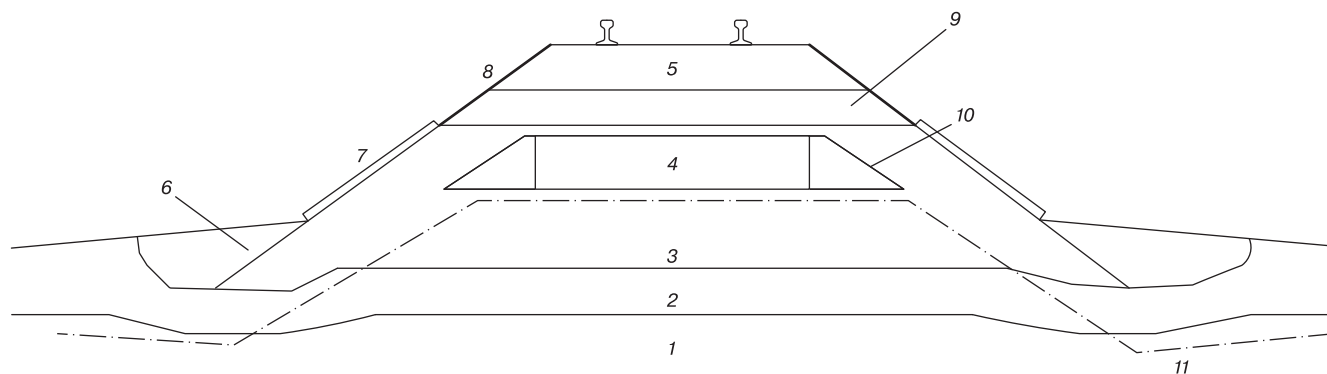


Рис. 1. Пример использования геосинтетических материалов в конструкциях земляного полотна и его обустройств\*:

1 — вечномёрзлый грунт; 2 — песок; 3 — твёрдомёрзлый песчаный грунт; 4 — пенополистирол; 5 — скальный грунт; 6 — песчаный грунт; 7 — укрепление траверсой; 8 — георешетка на откосах; 9 — сухомёрзлый или твёрдомёрзлый песок; 10 — обойма из геотекстиля; 11 — граница вечномёрзлого грунта

\* Источник: данные авторов

Fig. 1. Usage example of geosynthetic materials in construction and development of roadbed\*:

1 — permafrost soil; 2 — sand; 3 — hard frozen sand ground; 4 — polystyrene; 5 — rocky soil; 6 — sand ground; 7 — traverse stabilisation; 8 — geogrid reinforcement; 9 — dry frozen sand; 10 — geotextile mat; 11 — permafrost soil boundary

\* Source: authors' data

<sup>1</sup> Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года (основные положения): утв. Советом директоров ОАО «РЖД» от 23 декабря 2013 г. № 19.

<sup>2</sup> Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18 января 2013 г. № 75р.



Таким образом, проведенный анализ выявил необходимость разработки и верификации физико-математической модели определения разности потенциалов между рельсом и землей на участках электрифицированных железных дорог переменного тока с учетом неоднородности электрических параметров.

**Материалы и методы. Электрическая модель железнодорожного пути.** В общем случае цепь передачи электрической энергии в тяговом электроснабжении переменного тока можно разделить на части, представляющие систему тягового электроснабжения, включающую в себя тяговые подстанции, питающие и отсасывающие линии, контактную сеть, потребителей электрической энергии — электроподвижной состав, и обратную тяговую сеть, по которой тяговые токи возвращаются на тяговую подстанцию. С точки зрения электротехники железнодорожный путь представляет собой часть пути протекания обратного тягового тока в связи с тем, что рельсы практически невозможно изолировать от земли, и часть обратного тягового тока, протекающего от электроподвижного состава к тяговой подстанции, проходит по земле, в том числе и по балластной призме [5]. Модель<sup>3</sup> и схема замещения железнодорожного пути представлены на рис. 2.

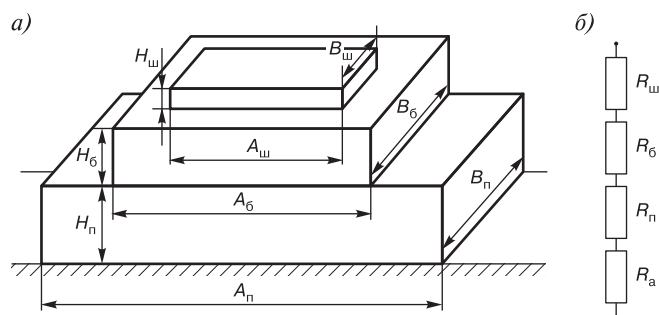


Рис. 2. Модель (а) и схема замещения (б) для определения переходного сопротивления «рельс — земля»\*

$H_{\text{ш}}, H_{\text{б}}, H_{\text{п}}$  — толщина шпалы, высота балласта, высота земляного полотна, м;  $A_{\text{ш}}, A_{\text{б}}, A_{\text{п}}$  — длина шпалы, средняя ширина балласта, средняя ширина земляного полотна, м;  $B_{\text{ш}}, B_{\text{б}}, B_{\text{п}}$  — средняя ширина шпалы, длина участка балласта, длина участка земляного полотна, м;  $R_{\text{ш}}, R_{\text{б}}, R_{\text{п}}, R_{\text{а}}$  — электрическое сопротивление шпалы, балласта, земляного полотна, растеканию тока в земле, Ом

\* Источник: а — [Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока]; б — данные авторов

Fig. 2. Model (a) and substitution scheme (b) for determining rail-to-earth resistance\*:

$H_{\text{ш}}, H_{\text{б}}, H_{\text{п}}$  — sleeper thickness, ballast height, roadbed height, m;  $A_{\text{ш}}, A_{\text{б}}, A_{\text{п}}$  — sleeper length, ballast average length, roadbed average length, m;  $B_{\text{ш}}, B_{\text{б}}, B_{\text{п}}$  — sleeper average length, ballast section length, roadbed section length, m;  $R_{\text{ш}}, R_{\text{б}}, R_{\text{п}}, R_{\text{а}}$  — electrical resistance of sleeper, ballast, roadbed, and current spreading in the ground, Ohm

\* Source: а — [Karyakin R. N. AC traction networks]; б — authors' data

В расчетах, как правило, используется допущение, что рельсы заземлены и разностью потенциалов между рельсом и землей можно пренебречь, однако использование геотекстиля в конструкции железнодорожного пути приводит к изменению его электрических характеристик [7] и, как следствие, увеличению сопротивления балласта [5] и изменению распределения обратного тягового тока, протекающего к тяговой подстанции, что может привести к нарушению работы устройств, подключенных к рельсам.

**Анализ существующих моделей.** Принято считать, что рельсовый путь представляет собой длинную линию, характеризующуюся продольным сопротивлением и поперечным или переходным сопротивлением «рельс — земля». Такую длинную линию также называют цепью с распределенными параметрами, при этом в случае равномерного распределения параметров цепи вдоль линии она называется однородной (рис. 3)<sup>4</sup>.

Первичные параметры длинной линии разделяются на продольные и поперечные, отнесенные к единице ее длины. К продольным параметрам относится сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$ , к поперечным — проводимость  $G$  и емкость  $C$ . Определяют значение напряжения и тока в любой точке длинной линии  $x$  из решения следующей системы уравнений<sup>5</sup>:

$$\begin{cases} \underline{U} = \underline{U}_1 \operatorname{ch} \gamma x - I_1 \underline{Z}_B \operatorname{sh} \gamma x; \\ I = I_1 \operatorname{ch} \gamma x - (\underline{U}_1 / \underline{Z}_B) \operatorname{sh} \gamma x, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\underline{Z}_B$  — волновое сопротивление рельсовой сети, Ом;  $\underline{U}_1$  — напряжение в начале длинной линии, В;  $I_1$  — ток в начале длинной линии, А;  $\gamma$  — коэффициент распространения рельсовой сети, 1/км.

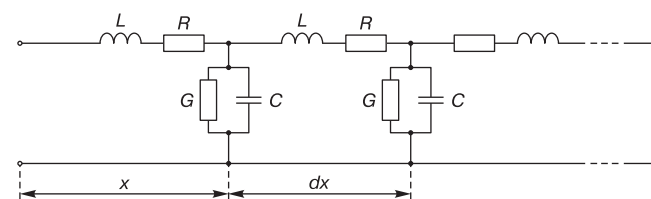


Рис. 3. Схема замещения длинной линии\*:

$R$  — сопротивление;  $L$  — индуктивность;  $G$  — проводимость;  $C$  — емкость

\* Источник: [Лукманов В. С. Теоретические основы электротехники. Теория линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей]

Fig. 3. Long line replacement circuit\*:

$R$  — resistance;  $L$  — inductance;  $G$  — conductivity;  $C$  — capacity  
\* Source: [Lukmanov V. S. Theoretical foundations of electrical engineering. Theory of linear and nonlinear electric and magnetic circuits]

<sup>3</sup> Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока: производств. изд. М.: Транспорт, 1987. 279 с.

<sup>4</sup> Лукманов В. С. Теоретические основы электротехники. Теория линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей: учебное пособие. Уфа: РИК УГАТУ, 2019. 219 с.

<sup>5</sup> Там же.

Определяют значение напряжения и тока в конце длинной линии  $l$  из системы уравнений<sup>6</sup>:

$$\begin{cases} \underline{U}_2 = \underline{U}_1 \operatorname{ch} \gamma l - \underline{I}_1 \underline{Z}_B \operatorname{sh} \gamma l; \\ \underline{I}_2 = \underline{I}_1 \operatorname{ch} \gamma l - (\underline{U}_1 / \underline{Z}) \operatorname{sh} \gamma l. \end{cases} \quad (2)$$

Определить зависимость напряжения в начале длинной линии и тока от напряжения в конце длинной линии и тока в ее конце можно путем решения системы уравнений относительно искомых напряжения и тока<sup>7</sup>:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \underline{I}_2 \underline{Z}_B \operatorname{sh} \gamma l; \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l + (\underline{U}_2 / \underline{Z}_B) \operatorname{sh} \gamma l. \end{cases} \quad (3)$$

В работе<sup>8</sup> представлена следующая модель рельсовой сети с двусторонним питанием (рис. 4).

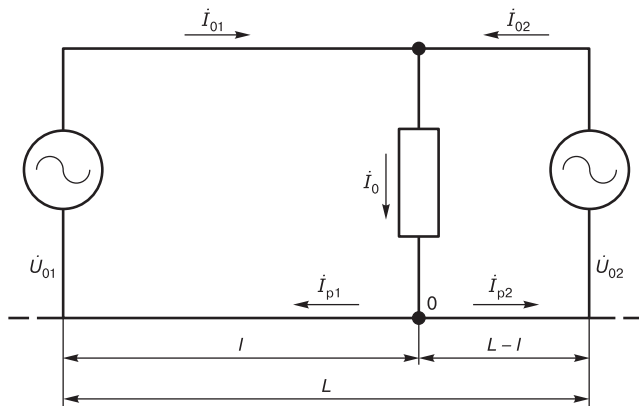


Рис. 4. Модель рельсовой сети при двустороннем питании и произвольном количестве нагрузок\*:

$\dot{I}_0$  — ток, потребляемый электроподвижным составом;  $\dot{I}_{01}, \dot{I}_{02}$  — токи, протекающие к электроподвижному составу от первой и второй тяговой подстанции;  $\dot{I}_{p1}, \dot{I}_{p2}$  — токи, протекающие от электроподвижного состава к отсасывающим линиям первой и второй тяговой подстанции;  $L$  — протяженность межподстанционной зоны;  $l$  — расстояние от первой тяговой подстанции до нагрузки

\* Источник: [Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока]

Fig. 4. Rail network model with two-way power supply and arbitrary number of loads\*:

$\dot{I}_0$  — current consumed by electric rolling stock;  $\dot{I}_{01}, \dot{I}_{02}$  — currents flowing to the electric rolling stock from first and second traction substation;  $\dot{I}_{p1}, \dot{I}_{p2}$  — currents flowing from electric rolling stock to suction lines of first and second traction substation;  $L$  — inter-substation zone length;  $l$  — distance from first traction substation to load

\* Source: [Karyakin R. N. AC traction networks]

В данной модели для определения величины потенциала в любой точке с координатой  $x$ , находящейся слева от нагрузки, необходимо воспользоваться формулой:

$$\Phi_{л(x)l} = \frac{1}{2} \cdot \underline{Z}_B \cdot (1 - \mu) \cdot \dot{I}_{0l} \times \left( e^{-\gamma \cdot x} - \left( 1 - \frac{l}{L} \right) \cdot e^{-\gamma \cdot (l+x)} - \frac{l}{L} \cdot e^{-\gamma \cdot (L-l+x)} \right), \quad (4)$$

где  $\mu$  — относительное сопротивление взаимной индукции между рельсом и контактной сетью.

Для определения величины потенциала в любой точке с координатой  $x$ , находящейся справа от нагрузки, необходимо воспользоваться формулой:

$$\Phi_{п(x)l} = \frac{1}{2} \cdot \underline{Z}_B \cdot (1 - \mu) \cdot \dot{I}_{0l} \times \left( e^{-\gamma \cdot x} - \left( 1 - \frac{l}{L} \right) \cdot e^{-\gamma \cdot (l+x)} - \frac{l}{L} \cdot e^{-\gamma \cdot (L-l-x)} \right). \quad (5)$$

Данная методика используется для определения максимальных потенциалов между рельсом и землей для двустороннего питания межподстанционной зоны с учетом влияния всех единиц электроподвижного состава, расположенных на расчетном участке.

Рассмотренные выше методы определения разности потенциалов между рельсом и землей, а также ряд альтернативных методов<sup>9, 10, 11</sup> [10] основаны на представлении рельсовой сети как однородной линии, где в качестве переходного сопротивления «рельс — земля» принимают усредненное значение для всего рассчитываемого участка. В то же время особенностью рельсовых сетей является неоднородность их электрических параметров, вызванная использованием различных материалов в структуре балластной призмы и применением широкого спектра рельсовых креплений. Такая неоднородность приводит к неравномерному изменению распределения разности потенциалов между рельсом и землей вдоль железнодорожного пути.

**Уточненная физико-математическая модель.** Схема замещения, представленная на рис. 5, предложена впервые для разработанной модели и основана на схеме замещения железнодорожного пути (рис. 2) и использовании метода конечных элементов<sup>12</sup>, согласно

<sup>6</sup> Там же.

<sup>7</sup> Там же.

<sup>8</sup> Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока.

<sup>9</sup> Дмитренко И. Е., Сапожников В. В., Дьяков Д. В. Измерение и диагностирование в системах автоматики, телемеханики и связи: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1994. 263 с.

<sup>10</sup> Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1978. 528 с.

<sup>11</sup> Крамаренко Е. Р. Методы измерения сопротивления изоляции в рельсовых цепях железнодорожной автоматики и телемеханики: метод. указания. Хабаровск: ДВГУПС, 2012. 31 с.

<sup>12</sup> Карпова И. М., Титков В. В. Компьютерные технологии в науке и производстве. Расчет физических полей в электроэнергетике: учебное пособие. СПб: СПбГПУ, 2010. 212 с.

которому схему замещения обратной тяговой рельсовой сети можно разбить на отдельные части, имеющие соединение друг с другом в узлах и называемые конечными элементами. Пример такого элемента для однопутного участка показан в пределах пунктирного прямоугольника на рис. 5. Конечные элементы имеют одинаковое строение и не содержат сложных структур. Метод конечных элементов используется в электроэнергетике как универсальный способ численного решения инженерных задач, связанных с моделированием физических процессов.

Использование в смежных элементах различных величин сопротивлений позволяет учитывать неоднородность электрических параметров рельсовой сети и земляного полотна, что в основном не учитывается в существующих моделях. Кроме того, при необходимости, возможно одновременное использование конечных элементов разных размеров при проведении одного расчета, что позволит получать более точные данные там, где это необходимо, оптимизируя время расчета и объем используемых ресурсов.

В разработанной модели необходимо учитывать и наличие междупутных соединителей в конечном элементе обратной тяговой рельсовой сети, а также место присоединения к рельсам отсасывающей линии тяговой подстанции. На рис. 6 в выделенном элементе

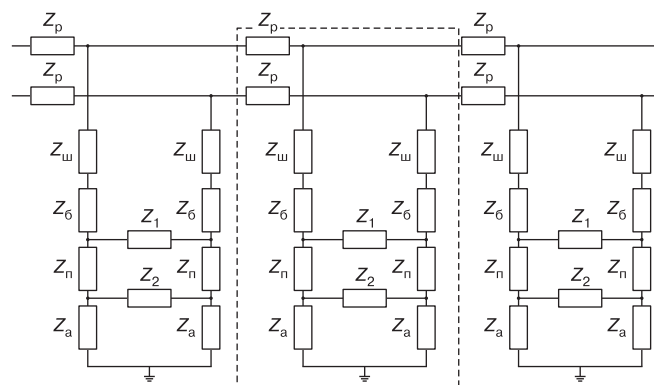


Рис. 5. Уточненная физико-математическая модель расчета разности потенциала между рельсом и землей\*:

$Z_{\text{ш}}$ ,  $Z_{\text{б}}$ ,  $Z_{\text{п}}$ ,  $Z_{\text{а}}$ ,  $Z_{\text{р}}$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  — электрическое сопротивление шпалы, балласта, земляного полотна, растеканию тока в земле, рельсовой нити, между балластом двух рельсовых нитей при наличии геосинтетических материалов, между земляным полотном двух рельсовых нитей при наличии геосинтетических материалов для одного элемента, Ом

\* Источник: данные авторов

Fig. 5. Refined physical-mathematical model for calculating the potential difference between rail and ground\*:

$Z_{\text{ш}}$ ,  $Z_{\text{б}}$ ,  $Z_{\text{п}}$ ,  $Z_{\text{а}}$ ,  $Z_{\text{р}}$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  — electrical resistance of sleeper, ballast, roadbed, and current spreading in the ground, rail string, considering geosynthetic materials presence, between ballast of two-rail string, considering geosynthetic materials presence, for one element, Ohm

\* Source: authors' data

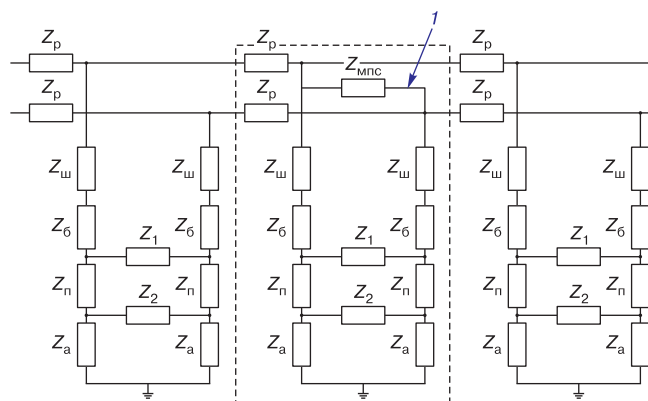


Рис. 6. Конечный элемент обратной тяговой рельсовой сети с наличием междупутного соединителя (I)\*:

$Z_{\text{мпс}}$  — электрическое сопротивление междупутного соединителя

\* Источник: данные авторов

Fig. 6. Finite element of a reverse traction rail network with inter-track connector (I)\*:

$Z_{\text{мпс}}$  — electrical resistance of the inter-path connector

\* Source: authors' data

схемы замещения обратной тяговой рельсовой сети установлен междупутный соединитель (поз. I).

Таким образом, для расчета системы тягового электроснабжения с учетом растекания тока в обратной тяговой рельсовой сети авторами разработаны следующие методы:

- метод отдельного расчета системы тягового железнодорожного электроснабжения и обратной тяговой рельсовой сети. В данном случае расчет разделяется на два этапа — на первом выполняется моделирование системы тягового электроснабжения железнодорожного транспорта, включая построение схем замещения всех ее элементов и учет взаимной индуктивности. Определяются токи нагрузки и токи в отсасывающих линиях. На втором, используя полученные значения токов нагрузки (информация о втекающих токах) и токов в отсасывающих линиях (информация о вытекающих токах), производится расчет параметров обратной тяговой сети. На электрифицированных участках переменного тока дополнительно на втором этапе расчета необходимо учитывать наведенное напряжение в рельсах;

- метод комплексного расчета системы тягового железнодорожного электроснабжения и обратной тяговой рельсовой сети. Метод предполагает создание единой расчетной модели, включающей все элементы цепи протекания тока: тяговые подстанции, контактную сеть, электроподвижной состав, обратную тяговую сеть, включая железнодорожный путь. Такой подход позволяет учесть взаимное влияние всех компонентов системы в едином расчетном пространстве.

Оба метода имеют свои преимущества: отдельный расчет проще в реализации и требует использования меньшего количества вычислительных ресурсов,

в то время как комплексный расчет обеспечивает более точные результаты за счет учета всех взаимосвязей в единой системе.

Для расчетов использовались уравнения узловых напряжений, сформированных методом узловых потенциалов. В матричном виде система может быть представлена следующим образом [11]:

$$\underline{Y}\dot{U} = \dot{J}, \quad (6)$$

где  $\underline{Y}$  — матрица узловых проводимостей, См;

$\dot{U}$  — вектор-столбец узловых напряжений;

$\dot{J}$  — вектор-столбец задающих токов.

Согласно ГОСТ Р 57670–2017<sup>13</sup> напряжения  $U_{yi}$  независимых узлов  $i$  при их количестве  $C_y$  в схеме замещения определяют как элементы столбца  $[U_{yi}]$  из уравнения:

$$[U_{yi}] = [Y_{yij}]^{-1}([I_{yi}] - [M_{ip}][Y_{vpq}][E_p]), \quad (7)$$

где  $[Y_{yij}]$  — матрица узловых проводимостей  $Y_{yij}$ , См;

$[I_{yi}]$  — столбец заданных токов  $I_{yi}$  в узлах, А;

$[M_{ip}]$  — определенная матрица соединений;

$[Y_{vpq}]$  — матрица проводимостей ветвей  $Y_{vpq}$ , См;

$[E_p]$  — столбец заданных ЭДС ветвей  $E_p$ , В.

Матрица узловых проводимостей определяется по следующей формуле:

$$[Y_{yij}] = [M_{ip}][Y_{vpq}][M_{ip}]_t, \quad (8)$$

где  $[M_{ip}]_t$  — транспонированная матрица  $[M_{ip}]$ .

В качестве элементов  $M_{ip}$  принимают:

- 1, если узел  $i$  является начальной вершиной ветви  $p$ ;
- –1, если узел  $i$  является конечной вершиной ветви  $p$ ;
- 0, если узел  $i$  не связан с ветвью  $p$ .

Матрица проводимостей ветвей определяется по формуле:

$$[Y_{vpq}] = [Z_{pq}]^{-1}, \quad (9)$$

где  $[Z_{pq}]$  — матрица собственных и взаимных сопротивлений  $Z_{pq}$  ветвей схемы, Ом.

Матрица собственных и взаимных сопротивлений для  $n$  проводов представляется следующим образом [11]:

$$[Z_{pq}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \dots & \underline{Z}_{1n} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & \dots & \underline{Z}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{Z}_{n1} & \underline{Z}_{n2} & \dots & \underline{Z}_{nn} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где на главной диагонали размещены собственные сопротивления.

Собственные и взаимные сопротивления определяются по формулам, представленным в ГОСТ Р 57670–2017<sup>14</sup> и [11], с учетом схем замещения (рис. 5 и рис. 6), для обратной тяговой рельсовой сети и для системы тягового электроснабжения<sup>15</sup> железнодорожного транспорта.

В целях проведения расчетов по уточненной физико-математической модели был написан скрипт на языке программирования Python, что позволило значительно сократить время проведения расчета по сравнению с ручными методами.

**Верификация модели.** Для подтверждения возможности применения уточненной физико-математической модели было организовано и проведено экспериментальное исследование работы обратной тяговой рельсовой сети. В качестве полигона проведения испытаний был выбран второй кольцевой путь Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ», расположенный в г. Щербинка. Длина пути составляет 5,7 км с установленным ограничением скорости до 80 км/ч. Его основным функциональным назначением является проведение ресурсных испытаний грузовых вагонов и конструкций верхнего строения пути. На пути смонтирована контактная сеть, состоящая из несущего троса марки ПБСМ-120, двух контактных проводов марки МФ-100 и двух усиливающих проводов марки АС-185, и уложен рельсовый путь из рельсов типа Р65, питающая линия выполнена проводом марки М-120 длиной 0,27 км. Электроснабжение осуществляется от тяговой подстанции Щербинка, на которой установлен силовой понижающий трансформатор ТДТНЖУ-40000/110-У1.

Основные характеристики проводов контактной сети и трансформатора приведены в табл. 1 и табл. 2 соответственно. Указанные технические параметры были использованы в уточненной физико-математической модели в качестве исходных данных для сравнения результатов расчета с опытными данными.

При проведении испытаний по второму кольцевому пути движение осуществлял грузовой состав с локомотивом переменного тока ВЛ80С. Движение осуществлялось в режиме постоянной скорости, что обеспечивало постоянство величины тока, потребляемого электровозом из контактной сети, и равномерное изменение координаты пути состава во времени относительно точки проведения измерений. Для проведения измерений была выбрана точка, расположенная

<sup>13</sup> ГОСТ Р 57670–2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 сентября 2017 г. № 1130-ст. М.: Стандартинформ, 2017. 48 с.

<sup>14</sup> ГОСТ Р 57670–2017. С. 43.

<sup>15</sup> Там же. С. 41.



Таблица 1  
Основные характеристики проводов тяговой сети\*

Table 1

Main characteristics of traction power wires\*

Марка провода/рельса	Материал провода/рельса	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Радиус, см	Удельное электрическое сопротивление провода, Ом/км
ПБСМ-120	Биметалл (сталь — медь)	120	0,7	0,382
МФ-100	Медь	100	0,57	0,176
АС-185	Биметалл (сталь — алюминий)	185	0,98	0,1591
Р65	Сталь рельсовая <sup>16, 17</sup>	8265	11,14	0,0254
М-120	Медь	120	0,7	0,158

\* Источник: ГОСТ Р 57670–2017 «Системы тягового электропитания железной дороги. Методика выбора основных параметров», ГОСТ Р 55647–2018 «Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия», ГОСТ 4775–91 «Провода неизолированные биметаллические сталеалюминиевые. Технические условия»

\* Source: GOST R 57670–2017 “Railway traction power supply systems. Methodology for selecting main parameters”, GOST R 55647–2018 “Copper contact wires and its alloys for electrified railways. Technical conditions”, GOST 4775–91 “Bare bimetallic steel-copper wires. Technical conditions”

Таблица 2  
Основные характеристики трансформатора\*

Table 2

Main characteristics of power transformer\*

Наименование трансформатора	$S_{\text{ном}}$ , кВА	$U_k$ , %	$P_{\text{хх}}$ , кВт	$P_k$ , кВт	$I_{\text{хх}}$ , %
ТДТНЖУ-40000/110-У1	40 000	17,5	36	220	0,6

\* Источник: таблица сформирована авторами на основании паспортных данных трансформатора

\* Source: table is compiled by the authors according to the power transformer nameplate data

на расстоянии 1,8 км от тяговой подстанции Щербинка вблизи дроссель-трансформатора. Схема проведения измерений изображена на рис. 7.

При движении состава по пути в точке измерения при помощи осциллографа и мультиметра регистрировался ток, протекающий в перемычке дроссель-

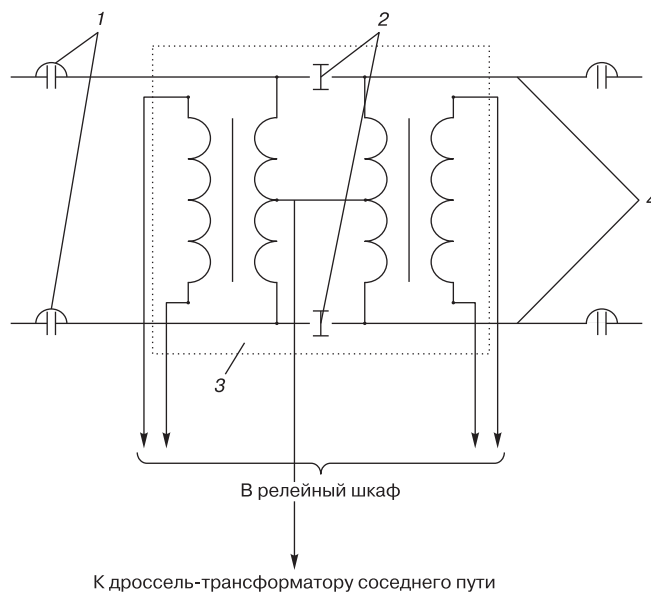


Рис. 7. Схема проведения измерений\*:  
1 — стыковое соединение; 2 — изолирующий стык;  
3 — дроссель-трансформатор; 4 — рельсы

\* Источник: данные авторов

Fig. 7. Measurement scheme\*:  
1 — connection joint; 2 — insulated joint;  
3 — impedance transformer; 4 — rails

\* Source: authors' data

трансформатора, непрерывно фиксировалось значение напряжения между рельсом и землей, ток фидера тяговой подстанции, а также были сняты осциллограммы тока в отсасывающей линии (рис. 8) и потенциала между рельсом и удаленной землей (рис. 9) и фиксировались координаты поезда в разные моменты времени.

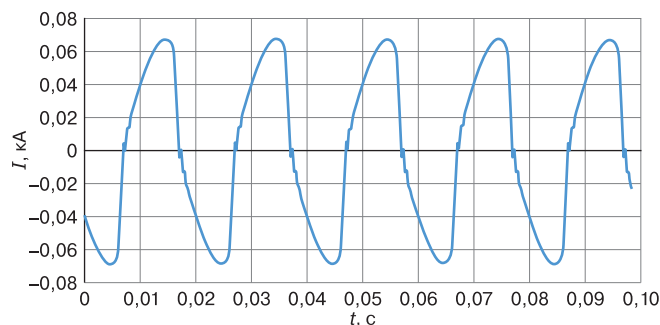


Рис. 8. Осциллограмма тока, полученная в результате измерений\*  
\* Источник: данные авторов

Fig. 8. Current oscillogram according to measurement results\*  
\* Source: authors' data

<sup>16</sup> ГОСТ 8161–75. Рельсы железнодорожные типа Р65: введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 18 июня 1975 г. № 1573. М.: Издательство стандартов, 1977.

<sup>17</sup> ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2013 г. № 1155-ст. М.: Стандартинформ, 2014. 95 с.



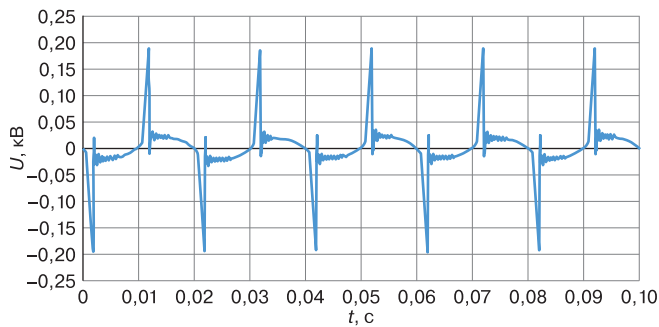


Рис. 9. Осциллограмма потенциала между рельсом и удаленной землей, полученная в результате измерений\*  
\* Источник: данные авторов

Fig. 9. Oscillogram of the potential between rail and remote ground, according to measurement results\*  
\* Source: authors' data

Форма сигнала на осциллограммах отличается от синусоид из-за наличия гармонических составляющих.

**Результаты.** В результате испытаний были получены зависимости потенциала между рельсом и землей в точке проведения измерений от координаты расположения электроподвижного состава.

Выполнено сравнение результатов расчетов по уточненной модели с данными, полученными в ходе эксперимента (рис. 10). Сплошной линией обозначена измеренная зависимость величины потенциала между рельсом и землей  $U$  от расположения электроподвижного состава относительно точки измерения  $L$ , а точками обозначены значения, полученные при помощи уточненной физико-математической модели.

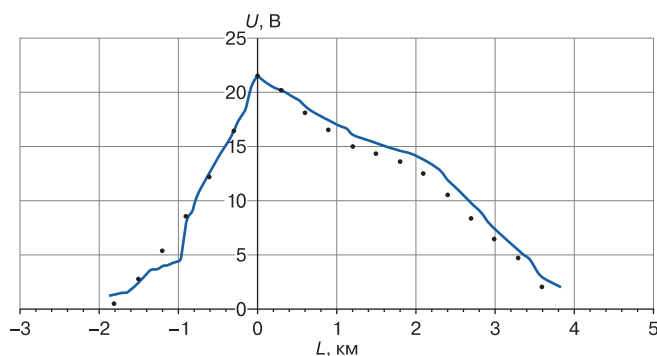


Рис. 10. Значения потенциала между рельсом и землей  $U$  от координаты положения точки проведения измерений  $L$ .\*

— опытные данные; • — результаты расчета с использованием уточненной физико-математической модели  
\* Источник: данные авторов

Fig. 10. Potential values between rail and ground  $U$  from coordinate of position of measurement point  $L$ .\*

— experimental data; • — calculation results using refined physical-mathematical model  
\* Source: authors' data

Согласно опытным данным, максимальное значение потенциала между рельсом и землей составляет 21,44 В. В результате расчета по уточненной физико-математической модели получено значение, равное 21,51 В, что соответствует относительной погрешности в 0,33 %. При этом, среднеквадратическое отклонение для рассчитанных точек составило 0,93 В.

Проведенные натурные исследования подтвердили корректность уточненной физико-математической модели и возможность ее практического применения для решения прикладных задач, связанных с определением режима работы устройств обратной тяговой рельсовой сети.

**Обсуждение.** Применение геосинтетических материалов в качестве разделительного слоя в конструкции пути создает серьезную проблему для электрифицированных железных дорог переменного тока, так как нарушает нормальное растекание обратных тяговых токов и приводит к возникновению опасных разностей потенциалов между рельсом и землей. Это ведет к снижению электробезопасности устройств энергоснабжения. Важность решения этой проблемы возрастает при проектировании высокоскоростных магистралей. Предложенный метод расчета по уточненной физико-математической модели учитывает пространственную неоднородность электрических параметров пути и позволяет принять меры, направленные на повышение электробезопасности.

Следующий этап работы предполагает доработку метода для применения к безбалластной конструкции пути.

**Заключение.** В ходе проведения исследования разработана уточненная физико-математическая модель, основанная на методе конечных элементов, ключевым преимуществом которой является возможность учета пространственной неоднородности электрических параметров пути.

Верификация модели, выполненная путем натурных испытаний на базе Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ», подтвердила возможность ее использования. Сравнительный анализ расчетных и натурных данных продемонстрировал корректность уточненной физико-математической модели.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

**Acknowledgments:** the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Funding:** the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Харьковская Е. Д. Анализ влияния технологии восстановления и строительства железнодорожных путей на электрическое сопротивление рельс — земля // Железная дорога: путь в будущее. Сборник материалов I Международной научной конференции аспирантов и молодых ученых, Москва, 28–29 апреля 2022 года. М.: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2022. С. 196–200. EDN: <https://elibrary.ru/escscj>.

Khar'kovskaya E. D. Analysis of the impact of the technology of restoration and construction of railway tracks on the rail-to-earth electrical resistance. *Railway: the way to the future. Collection of materials by postgraduate students and young scientists, 28–29<sup>th</sup> April, 2022*. Moscow: Railway Research Institute, 2022. P. 196–200. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/escscj>.

2. Корниенко В. В., Фигурнов Е. П. Токи и потенциалы цепи обратного тока тяговой сети с ЭУП // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2002. № 1. С. 65–70. EDN: <https://elibrary.ru/jvxfjh>.

Kornienko V. V., Figurnov E. P. Currents and potentials of the reverse current circuit of the traction network with ECM. *Vestnik RGUPS*. 2002;(1):65–70. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/jvxfjh>.

3. Наумов А. В., Наумов А. А. Потенциал рельсов и электробезопасность // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 5. С. 20–23. EDN: <https://elibrary.ru/sdjzld>.

Naumov A. V., Naumov A. A. Rail potential and electrical safety. *Automation, Communications, Informatics*. 2014;(5):20–23. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/sdjzld>.

4. Остапенко А. Н. Экспериментальное исследование потенциалов рельсовой сети на участках переменного тока при развешивании полигонов тяжеловесного движения на железных дорогах России // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2009. № 6. С. 40–44. EDN: <https://elibrary.ru/kxrulld>.

Ostapenko A. N. Experimental research of rail circuit potentials at AC line sections when enlargement of heavy haul sites on Russian railways. *Russian Railway Science Journal*. 2009;(6):40–44. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/kxrulld>.

5. Крылов А. А., Ребров И. А., Рудашевская А. В., Рудашевский Р. А., Харьковская Е. Д. Влияние переходного сопротивления балласта верхнего строения пути на величину потенциала рельс — земля на участках железных дорог, электрифицированных на переменном токе // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 16–22. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-16-22>. EDN: <https://elibrary.ru/swlkkq>.

Krylov A. A., Rebrov I. A., Rudashevskaya A. V., Rudashevskiy R. A., Khar'kovskaya E. D. Transition resistance influence of the upper structure track ballast on the rail-to-earth potential at AC railway sections. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):16–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-16-22>. EDN: <https://elibrary.ru/swlkkq>.

6. Быкадоров А. Л., Заруцкая Т. А., Муратова-Милехина А. С. Применение теории распознавания образов при определении места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2(82). С. 119–128. [https://doi.org/10.46973/0201-727X\\_2021\\_2\\_119](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_2_119). EDN: <https://elibrary.ru/pksius>.

Bykadorov A. L., Zarutskaya T. A., Muratova-Milekhina A. S. Application of the pattern recognition theory in determining the location of a short circuit in ac traction networks. *Vestnik RGUPS*. 2021;2(82):119–128.

(In Russ.). [https://doi.org/10.46973/0201-727X\\_2021\\_2\\_119](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_2_119). EDN: <https://elibrary.ru/pksius>.

7. Лунев С. А., Дремин В. В., Ходкевич А. Г., Сероштанов С. С. Исследование влияния капитального ремонта пути на обратную тяговую сеть // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 2. С. 9–11. <https://doi.org/10.34649/AT.2020.2.2.003>. EDN: <https://elibrary.ru/mezney>.

Lunev S. A., Dremmin V. V., Hodkevich A. G., Seroshtanov S. S. Research of influence of the strengthened capital track repair on the return traction network. *Automation, Communications, Informatics*. 2020;(2):9–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.34649/AT.2020.2.2.003>. EDN: <https://elibrary.ru/mezney>.

8. Скоков Р. Б., Кремлев И. А., Тарабин И. В., Терехин И. А. Оценка условий электробезопасности заземления на рельс устройств тяговой сети в условиях применения изолирующих материалов при капитальном ремонте железнодорожного полотна // Известия Транссиба. 2015. № 2(22). С. 96–101. EDN: <https://elibrary.ru/udyihh>.

Skokov R. B., Kremlev I. A., Tarabin I. V., Terekhin I. A. Evaluation of electrical ground for rail traction network devices in the application insulating materials at major railway repairs. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2015;2(22):96–101. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/udyihh>.

9. Железнов Д. В., Тарасова Е. М., Исайчева А. Г. Применение обратного пассивного тягового провода с учетом сопротивления элементов железнодорожного полотна // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 6(48). С. 14–17. EDN: <https://elibrary.ru/tjwomd>.

Zheleznov D. V., Tarasov E. M., Isaicheva A. G. The use of a reverse passive traction wire, taking into account the resistance of the elements of the railway track. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2014;6(48):14–17. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tjwomd>.

10. Косарев А. Б., Виноградов С. А., Король Ю. Н., Косарев И. А. Электробезопасность электроустановок транспорта. М.: РАС, 2022. 448 с. EDN: <https://elibrary.ru/bgkpcp>.

Kosarev A. B., Vinogradov S. A., Korol Yu. N., Kosarev I. A. *Electrical safety of electrical installations of transport*. Moscow: RAS, 2022. 448 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/bgkpcp>.

11. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИРГУПС, 2010. 160 с. EDN: <https://elibrary.ru/rnjvkj>.

Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Joint modeling methods of traction and external power supply systems of alternating current railroads*. Irkutsk: Irkutsk State University of Communications, 2010. 160 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/rnjvkj>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Елена Дмитриевна ВИННИКОВА**, ведущий специалист, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 7456-7726, <https://orcid.org/0000-0002-1601-2474>

**Александр Борисович КОСАРЕВ**, д-р техн. наук, профессор, научный руководитель института — ученый секретарь, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Elena D. VINNIKOVA**, Leading Specialist, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 7456-7726, <https://orcid.org/0000-0002-1601-2474>

**Alexander B. KOSAREV,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific Adviser — Scientific Secretary, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

**ВКЛАД АВТОРОВ**

**Елена Дмитриевна ВИННИКОВА.** Разработка уточненной физико-математической модели, выполнение расчетов, верификация разработанной модели, написание статьи (80 %).

**Александр Борисович КОСАРЕВ.** Формулировка цели и методологии исследования, анализ результатов, выводы (20 %).

**CONTRIBUTION OF THE AUTHORS**

**Elena D. VINNIKOVA.** Refined physical-mathematical model design, calculations performance, verification of the designed model, article writing (80 %).

**Alexander B. KOSAREV.** Research methodology and goal formulation, results analysis, conclusions (20 %).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию 09.09.2025, рецензия от первого рецензента получена 18.09.2025, рецензия от второго рецензента получена 26.09.2025, рецензия от третьего рецензента получена 29.09.2025, рецензия от четвертого рецензента получена 13.10.2025, принята к публикации 07.11.2025.

The article was submitted 09.09.2025, first review received 18.09.2025, second review received 26.09.2025, third review received 29.09.2025, fourth review received 13.10.2025, accepted for publication 07.11.2025.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 625.033:625.143.482

EDN: <https://elibrary.ru/fqcvmj>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-262-272>

Научная специальность: 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог



## Прочность и устойчивость безбалластной конструкции верхнего строения бесстыкового пути высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург

А. В. Романов, А. А. Киселев✉

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Разработка проекта первой в нашей стране высокоскоростной железнодорожной магистрали со скоростями движения поездов до 400 км/ч сопряжена с острой проблемой недостаточности нормативно-технической базы, регламентирующей методики расчета конструкции железнодорожного пути, в том числе на устойчивость от воздействия экстремальной температуры и прочность при совместном действии экстремальной температуры и подвижного состава. Целью настоящей статьи является разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути на безбалластной конструкции верхнего строения пути по условию прочности и устойчивости, а также оценка рисков температурного выброса и потери прочности рельсовой плети бесстыкового пути.

**Материалы и методы.** Для расчета бесстыкового пути на устойчивость использовался метод, который предусматривает учет начальной ненапряженной неровности рельсовых плетей самой неблагоприятной формы. Для расчета бесстыкового пути на прочность использовался метод конечных элементов.

**Результаты.** Расчеты показали, что допускаемое повышение температуры рельсовой плети относительно температуры закрепления по условию устойчивости можно принять равным 111 °С. Допускаемое понижение температуры рельсовой плети относительно температуры закрепления по условию прочности составляет 98 °С, что сравнимо с традиционной конструкцией пути на балласте.

**Обсуждение и заключение.** Предусмотренная проектной документацией безбалластная конструкция верхнего строения пути имеет большой запас устойчивости, по сравнению с традиционной конструкцией на балласте. Технические решения безбалластной конструкции верхнего строения пути на бесстрелочных участках, расположенных на земляном полотне, практически исключают риски нарушения механической безопасности как по условию прочности, так и по условию устойчивости. В рамках опытной подконтрольной эксплуатации безбалластной конструкции на перегоне Саблино – Тосно и участке Алабушево – Новая Тверь рассчитанная аналитическим методом величина повышения температуры рельсовой плети относительно температуры закрепления по условию устойчивости и рассчитанная методом конечно-элементного моделирования величина понижения температуры рельсовой плети относительно температуры закрепления по условию прочности должны быть подтверждены экспериментально.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железнодорожный бесстыковой путь, безбалластная конструкция верхнего строения пути, высокоскоростная железнодорожная магистраль, прочность, устойчивость

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Романов А. В., Киселев А. А. Прочность и устойчивость безбалластной конструкции верхнего строения бесстыкового пути высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 262–272. EDN: <https://elibrary.ru/fqcvmj>.



## TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article  
UDK 625.033:625.143.482  
EDN: <https://elibrary.ru/fqcvmj>  
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-262-272>  
Scientific specialty: 2.9.2. Railway track, survey and design of railways



# Strength and stability of continuous welded rail track of ballastless track superstructure of Moscow – Saint Petersburg high-speed main line

Andrei V. Romanov, Artyom A. Kiselev✉

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
Saint Petersburg, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** The development of high-speed main line with the speed up to 400 km/h is strictly connected with the major problem of insufficient normative technical documentation which regulates methodology of railway design calculation, including stability from extreme temperature and strength under its combined action with rolling stock. The aim of the article is to develop methodology for assessing the stress-strain state of a continuous welded rail track on a ballastless track based on strength and stability, as well as to assess temperature release risks and loss of rail string strength.

**Materials and methods.** In order to calculate continuous welded rail track for stability the authors employed method which involves accounting for rail string initial unstressed unevenness of the most unfavorable shape. Finite element method was used to estimate continuous welded rail track strength.

**Results.** The calculations show that the permissible temperature increase of rail string in comparison with fixing temperature under the terms of stability may be equivalent to 111 °C, and permissible temperature decrease of the rail string is 98 °C, which is comparable to the traditional track design on a ballast.

**Discussion and conclusion.** Ballastless design of the superstructure, required by documentation, has greater stability capacity in comparison with traditional design on a ballast. Technical solutions of ballastless track design of superstructure on pointless sections placed on roadbed nearly eliminate risks of mechanical safety violation both in terms of strength and stability. As a part of experimental operation of high-speed railway line on Sablino – Tosno space interval and Alabushevo – Novaya Tver section, analytically calculated temperature increase value of rail string in terms of fixing temperature under the terms of stability and temperature decrease value of rail string in comparison with the fixing temperature under the terms of strength using finite element modelling should be proven experimentally.

**KEYWORDS:** continuous welded rail track, ballastless design of track superstructure, high-speed main line, strength, stability

**FOR CITATION:** Romanov A.V., Kiselev A.A. Strength and stability of continuous welded rail track of ballastless track superstructure of Moscow – Saint Petersburg high-speed main line. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):262–272. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-262-272>.



**Введение.** В настоящее время продолжается реализация проекта первой высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (далее — ВСЖМ-1) со скоростями движения поездов до 400 км/ч. В соответствии с положениями статьи 16 Федерального закона № 384-ФЗ<sup>1</sup> при разработке проектной документации требования механической безопасности железнодорожного пути должны быть подтверждены различными способами, в том числе расчетами, испытаниями, моделированием сценариев возникновения опасных природных явлений и/или техногенных воздействий.

Применительно к безбалластной конструкции бесстыкового железнодорожного пути ВСЖМ-1 следует рассмотреть две ситуации:

1. Нарушение прочности рельсовой плети (излом) вследствие одновременного воздействия экстремально низких температур и максимального воздействия железнодорожного подвижного состава.

2. Потеря устойчивости формы и положения, реализующаяся в виде температурного выброса пути из-за воздействия экстремально высоких температур воздуха совместно с нагревом солнцем.

Расчетам железнодорожного пути на прочность посвящено множество работ. Для традиционной балластной конструкции верхнего строения пути существуют как сложные методы, основанные на решении дифференциальных уравнений колебаний рельса — однослойной балки на модифицированном (имеющем присоединенную массу и демпфирование) упругом основании [1], так и более простые практические методы расчета<sup>2</sup>. Расчеты безбалластной конструкции верхнего строения пути (далее — БВСП) на прочность подробно изложены в работе<sup>3</sup>. Методика расчета основана на решении дифференциальных уравнений колебаний многослойной балки, лежащей на модифицированном упругом основании.

Большинство исследований устойчивости бесстыкового пути основано на энергетическом методе [2]. Также большое количество исследований устойчивости опирается на метод решения дифференциальных уравнений равновесия со множеством допущений [3, 4]. В работе [5] применены интегральные уравнения для определения критической продольной силы в плетях бесстыкового пути. Все методы основаны на задании возможной формы искривления рельсовой колеи и определении критической температурной продольной силы, при достижении которой путь теряет устойчи-

вость. Под руководством Е. М. Бромберга испытательная лаборатория ЦНИИ (ныне — АО «ВНИИЖТ») [6] провела объемные экспериментальные работы по исследованию устойчивости бесстыкового пути против выброса.

В работе [7] рассмотрена вероятность выброса бесстыкового пути, основанная на анализе надежности конструкции бесстыкового пути в целом. Были выделены основные параметры, влияющие на устойчивость, и предложена стратегия мониторинга и текущего содержания бесстыкового пути [8, 9].

Действующая Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути<sup>4</sup>, основанная на вышеприведенных методических разработках ученых ЦНИИ, МИИТ, ЛИИЖТ (АО «ВНИИЖТ», РУТ (МИИТ), ПГУПС соответственно) и апробированная в ходе многочисленных экспериментов, распространяется только на традиционную балластную конструкцию верхнего строения пути.

В зарубежной практике широкое распространение для исследования устойчивости и прочности железнодорожного пути получил метод конечных элементов [10, 11]. Данный метод позволяет рассматривать сложные процессы, такие как взаимодействие рельсовых плетей бесстыкового пути с пролетными строениями мостов, нелинейную работу балластного слоя, а также работу плетей бесстыкового пути на БВСП.

Стоит отметить, что ни одна из отечественных методических разработок в настоящее время не удовлетворяет требованиям расчета бесстыкового пути на БВСП по условию прочности и устойчивости. Целью работы является предложение такой методики с расчетом напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути на БВСП в условиях ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург и оценкой рисков температурного выброса и излома плети.

**Материалы и методы. Описание принятой конструкции безбалластного верхнего строения пути ВСЖМ-1.** В общем случае, БВСП состоит из рельсовых плетей типа Р65 специального назначения для высокоскоростного движения, упругих промежуточных рельсовых скреплений, подрельсовой опоры (рис. 1), сборной рельсовой плиты из предварительно напряженного железобетона заводского изготовления, промежуточного упругого слоя, слоя самоуплотняющегося бетона (далее — СУБ), железобетонной плиты фундамента. Конструкция БВСП может укладываться на основную площадку земляного полотна с верхним защитным

<sup>1</sup> Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». «Российская газета» от 31 декабря 2009 г. Ст. 16.

<sup>2</sup> Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утв. расп. ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706/р. Доступ из АСПИЖТ (дата обращения: 09.09.2025).

<sup>3</sup> Савин А. В. Условия применения безбалластного пути: дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2017. 444 с.

<sup>4</sup> Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути: утв. расп. ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2544/р.

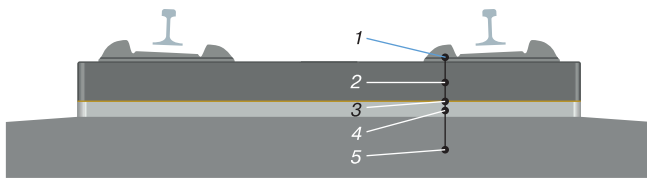


Рис. 1. Принципиальная схема безбалластного верхнего строения пути\*:

1 — подрельсовая опора; 2 — рельсовая плита; 3 — упругий слой; 4 — слой самоуплотняющегося бетона; 5 — фундаментная плита  
\* Источник: данные авторов

Fig. 1. Ballastless track superstructure schematic diagram\*:

1 — underrail footing; 2 — rail plate; 3 — elastic layer; 4 — layer of self-consolidating concrete; 5 — base plate  
\* Source: authors' data

слоем из асфальтобетона, имеющего фрезеровку поверхности для лучшего сцепления с плитой фундамента. На пролетных строениях искусственных сооружений предусматривается устройство арматурных выпусков.

С точки зрения прочности и устойчивости бесстыкового пути элементы БВСП имеют следующие характеристики, согласно специальным техническим условиям (далее — СТУ)<sup>5</sup>:

- рельсы типа Р65 категории ДТ350ВС400 с пределом текучести, равным 800 МПа;
- упругие рельсовые скрепления с усилием прижатия рельсов клеммами к опорам не менее 20 кН, сопротивлением перемещению рельсов в продольном направлении не менее 14 кН в одном узле промежуточного скрепления, вертикальной жесткостью узла скрепления 50 кН/мм, поперечной жесткостью скрепления 30 кН/мм;
- рельсовые плиты с эпюрой подрельсовых опор не менее 1820 шт./км.

Масса одного погонного метра безбалластной конструкции верхнего строения пути ВСЖМ-1 составляет 4,279 т, что в 1,14 раза тяжелее балластной конструкции. Конструкция БВСП имеет более жесткие связи (рельсовой плиты и фундаментной плиты через слой СУБ, фундаментной плиты и пролетного строения), чем в традиционной балластной конструкции. Таким образом, конструкция БВСП создает значительно большее сопротивление поперечным смещениям рельсовых плетей по сравнению с традиционной балластной конструкцией.

**Расчет бесстыкового пути на устойчивость.** Имеющиеся в нормативных документах величины допускаемых повышений температуры по условию устойчивости и соответствующие им критические температурные силы установлены на основе экспериментальных

данных АО «ВНИИЖТ» для конструкции бесстыкового пути на балласте. Подобные подтвержденные опытом значения критических температурных сил и величин допускаемого повышения температуры рельсовой плиты, по сравнению с температурой закрепления по условию устойчивости для бесстыкового пути, уложенного на БВСП в настоящее время, к сожалению, отсутствуют. Таким образом, весьма остро стоит вопрос о количественной оценке устойчивости бесстыкового пути на БВСП.

Существуют способы аналитической оценки критической температурной силы, однако, как было заявлено выше, они также были разработаны для конструкции бесстыкового пути на балласте. За основу расчета бесстыкового пути на БВСП авторами предлагается использовать методику, предложенную А.Я. Коганом в работе [12].

Возможность применения данной методики, по мнению авторов статьи, основана на гипотезе о том, что монолитная конструкция БВСП не имеет возможности перемещения в поперечном направлении, а поперечные деформации рельсов происходят исключительно за счет промежуточных рельсовых скреплений, которые можно описать функцией:

$$f_1(y) = B \arctg \frac{y}{b}, \quad (1)$$

где  $y$  — поперечная деформация рельса, мм;

$B$  и  $b$  — коэффициенты, определяемые по результатам аппроксимации экспериментальных зависимостей сопротивления пути поперечному сдвигу от величины этого сдвига.

Ввиду отсутствия экспериментальных зависимостей сопротивления пути поперечному сдвигу от величины этого сдвига для БВСП, определим параметры  $B$  и  $b$  в представленном выше выражении, исходя из следующих соображений.

Согласно СТУ<sup>6</sup>, поперечная жесткость промежуточного рельсового скрепления принята равной 30 кН/мм, удерживающая способность узла рельсового скрепления в горизонтальной плоскости — 50 кН, а максимальное поперечное перемещение рельса — 3 мм. Исходя из этих исходных положений выдвинута следующая гипотеза. На начальном участке сопротивление рельсовой плиты поперечным деформациям возрастает линейно, в соответствии с удерживающей способностью узла промежуточного рельсового скрепления, т.е. 30 кН/мм. При достижении предельного значения сопротивления  $Q_{\max} = 50$  кН дальнейший рост прекращается и сопротивление становится постоянным. Эти условия обозначены синей линией на графике,

<sup>5</sup> Специальные технические условия. Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург (ВСЖМ-1). Изменение 1. ФГБОУ ВО ПГУПС. 2023. 278 с.

<sup>6</sup> Там же.

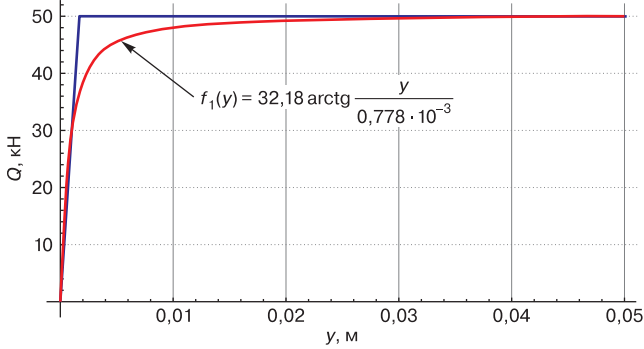


Рис. 2. Зависимость сопротивления рельсовой плиты поперечным деформациям  $Q$  от величины деформации  $y^*$   
\* Источник: данные авторов

Fig. 2. Dependence of the rail string resistance to lateral deformations  $Q$  on the deformation magnitude  $y^*$   
\* Source: authors' data

приведенном на рис. 2. Красной линией представлена подобранная к этим условиям функция арктангенса с параметрами  $B = 32,18$  кН/м,  $b = 0,778 \cdot 10^{-3}$  м.

Таким образом, исходную и аппроксимированную функцией арктангенса зависимости можно выразить следующими выражениями:

- исходная:

$$Q = \begin{cases} 30 \cdot 10^3 y, & \text{если } y \in \left[0, \frac{5}{3} \cdot 10^{-3}\right], \\ 50, & \text{если } y > \frac{5}{3} \cdot 10^{-3}; \end{cases} \quad (2)$$

- аппроксимированная функцией арктангенса:

$$Q_2 = 32,18 \arctg \frac{y}{0,778 \cdot 10^{-3}}. \quad (3)$$

Для количественной оценки соответствия двух функций используем следующие метрики<sup>7</sup>:

- среднеквадратическая ошибка (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_1(y_i) - Q_2(y_i)]^2 = 1,644 \text{ кН}, \quad (4)$$

где  $N$  — количество точек для расчета среднеквадратической ошибки;

$y_i$  — поперечная деформация рельса, принадлежащая множеству (2) мм;

- средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_1(y_i) - Q_2(y_i)| = 0,560 \text{ кН}; \quad (5)$$

- максимальная абсолютная ошибка (MaxError):

$$\text{MaxError} = \max_{1 \leq i \leq N} |Q_1(y_i) - Q_2(y_i)| = 12,587 \text{ кН}; \quad (6)$$

- интегральная ошибка:

$$\varepsilon_{\text{int}} = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} |Q_1(y) - Q_2(y)| dy = 0,112 \text{ кН} \cdot \text{мм}. \quad (7)$$

Значения метрик вычислены для диапазона значений  $y \in [0; 0,2]$  м с шагом дискретизации  $\Delta y = 2 \cdot 10^{-4}$  м.

Из всех значений метрик максимальная абсолютная ошибка, характеризующая максимальное расхождение между функциями, имеет величину 12,587 кН в зоне сопряжения линейного нарастания и установившегося сопротивления поперечному сдвигу. По мнению авторов, такое несоответствие в указанной зоне следует признать допустимым ввиду невозможности иначе описать зависимость функцией арктангенса.

Также при расчете вводятся следующие предположения и допущения:

1. Расчет ведется на две рельсовые нити, в которых действуют равные и постоянные температурные продольные силы  $N = \text{const}$ .
2. Неровности обеих рельсовых нитей имеют одинаковый радиус кривизны.
3. Расчет ведется в квазистатической постановке задачи. Демпфирование и другие параметры вязкости не учитываются.

Критические параметры бесстыкового пути связаны следующей системой трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases} B^* = B - \frac{2N_k}{\pi R}; \\ b^* = b \left(1 - \frac{2N_k}{\pi BR}\right) \sec^2\left(\frac{N_k}{BR}\right); \\ N_k = 2 \sqrt{\frac{2b^* B^* EI_z^0 \sqrt{b^{*2} + C^2} - b^*}{C^2 \sqrt{b^{*2} + C^2}}}; \\ \omega = \sqrt[4]{\frac{2b^* B^* (\sqrt{b^{*2} + C^2} - b^*)}{C^2 EI_z^0 \sqrt{b^{*2} + C^2}}}; \\ C_6 = \frac{2B^* (\sqrt{b^{*2} + C^2} - b^*) + C^2 EI_z^0 \omega^4 + C^2 r \omega^2}{CN_k \omega^2}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $N_k$  — критическая температурная продольная сила, кН;

$R$  — радиус кривой, м;

$E$  — модуль упругости рельсовой стали,  $E = 2,1 \times 10^5$  МПа;

$I_z^0$  — момент инерции рельса относительно главной оси,  $I_z^0 = 0,564 \cdot 10^{-5}$  м<sup>4</sup>;

$C$  — амплитуда напряженной неровности, м;

<sup>7</sup> Оценка качества в задачах классификации и регрессии // Вики-портал «ALGOWIKI» ИТМО. URL: [https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Оценка\\_качества\\_в\\_задачах\\_классификации\\_и\\_регрессии&mobileaction=toggle\\_view\\_desktop](https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Оценка_качества_в_задачах_классификации_и_регрессии&mobileaction=toggle_view_desktop) (дата обращения: 16.09.2025).

$C_6$  — амплитуда бытовой ненапряженной неровности, м;

$\omega$  — частота ненапряженной неровности,  $\text{м}^{-1}$ ;

$r$  — тангенс угла наклона первой производной кривой  $f_1(y)$ ,  $r = 711 \text{ кН}$ .

Длина волны неблагоприятной неровности  $l$ , м, соответствующая частоте  $\omega$ , определяется по формуле

$$l = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (9)$$

Допускаемое повышение температуры рельсовой плети по условию устойчивости  $[\Delta t_y]$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , определяется по формуле

$$[\Delta t_y] = \frac{[N_k]}{2\alpha EF}, \quad (10)$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения рельсовой стали,  $\alpha = 0,0000118 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ ;

$F$  — площадь поперечного сечения рельса,  $F = 0,82 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ .

Допускаемая критическая температурная продольная сила  $[N_k]$  принимается с коэффициентом безопасности, равным 1,5. Результаты многовариантных расчетов при различных значениях радиусов кривых

и амплитуды напряженной неровности приведены в таблице.

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет сделать следующий вывод. В связи с тем, что на ВСЖМ-1 применяются пологие кривые, радиус не оказывает существенного влияния на величину критической температурной силы. В большей степени критическая температурная сила зависит от величины начальной неровности. Дальнейшие расчеты выполнены для железнодорожного пути в кривом участке радиусом  $R = 10\,000 \text{ м}$ . Зависимость критической продольной температурной силы, длины волны неблагоприятной неровности и допускаемого повышения температуры по условию устойчивости от величины амплитуды бытовой ненапряженной неровности на пути представлена на рис. 3.

Выполним оценку величины критической температурной силы и соответствующего ей допускаемого повышения температуры рельса по условию устойчивости для условий эксплуатации ВСЖМ-1.

На основании результатов расчетов, представленных на рис. 3, амплитуде бытовой ненапряженной неровности поставлена в соответствие длина волны неблагоприятной неровности согласно схеме (рис. 4).

Таблица

Результаты расчета критической температурной продольной силы, длины волны неблагоприятной неровности и амплитуды бытовой ненапряженной неровности на пути\*

Table

Calculation results for critical longitudinal thermal force, wavelength of the unfavorable irregularity, amplitude of the initial unstressed irregularity on the track\*

Амплитуда напряженной неровности $C$ , мм	Радиус кривой $R$ , м	Критическая температурная продольная сила $N_k$ , кН	Длина волны неблагоприятной неровности $l$ , м	Амплитуда бытовой ненапряженной неровности $C_6$ , мм
2,0	1 000	6785	4,10	3,51
	5 000	7449	3,94	3,28
	10 000	7555	3,92	3,24
	15 000	7592	3,92	3,23
3,0	1 000	4691	4,77	7,42
	5 000	5017	4,63	7,04
	10 000	5066	4,61	6,98
	15 000	5083	4,60	6,96
4,0	1 000	3589	5,36	12,71
	5 000	3783	5,23	12,17
	10 000	3811	5,22	12,09
	15 000	3820	5,21	12,06
5,0	1 000	2908	5,90	19,39
	5 000	3036	5,78	18,68
	10 000	3054	5,76	18,58
	15 000	3060	5,76	18,55

\* Источник: данные авторов

\* Source: authors' data



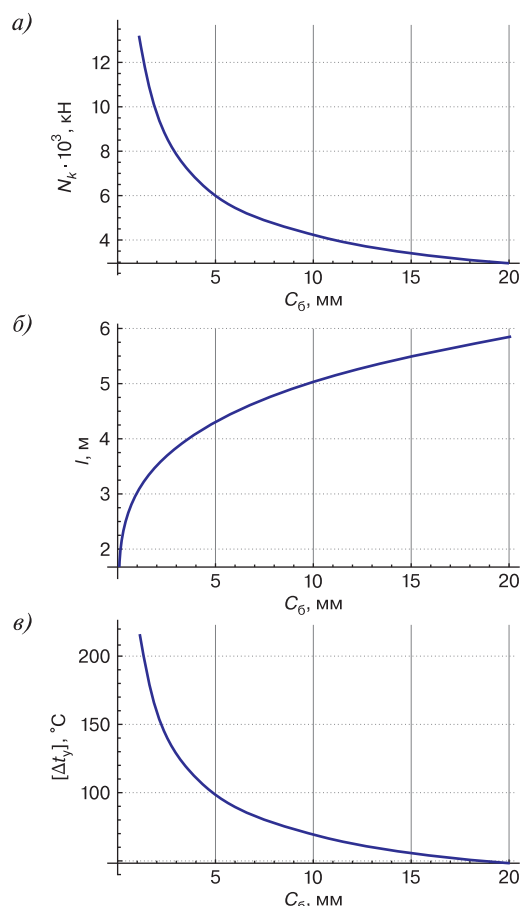


Рис. 3. Зависимость критической продольной температурной силы (а), длины волны неблагоприятной неровности (б), допускаемого повышения температуры по условию устойчивости (в) от величины амплитуды бытовой ненапряженной неровности на пути в кривом участке пути радиусом  $R = 10\,000$  м\*  
\* Источник: данные авторов

Fig. 3. Dependence of critical longitudinal thermal force (a), wavelength of the unfavorable irregularity (б), permissible temperature rise based on stability conditions (в) on the amplitude of the initial unstressed irregularity on a curved track section with radius  $R = 10\,000$  m\*  
\* Source: authors' data

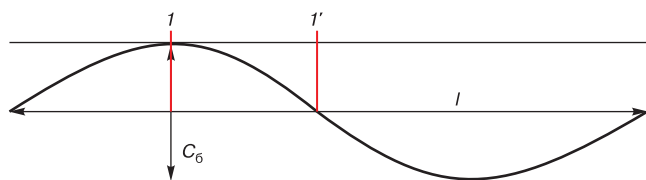


Рис. 4. Длина волны неблагоприятной неровности\*:  $I-I'$  — участок длины волны;  $l$  — длина волны;  $C_6$  — амплитуда волны  
\* Источник: данные авторов

Fig. 4. Wavelength of the unfavorable irregularity\*:  $I-I'$  — wavelength section;  $l$  — wavelength;  $C_6$  — wave amplitude  
\* Source: authors' data

В соответствии с представленной схемой на участке  $I-I'$ , длина которого  $l/4$ , а амплитуда  $C_6/2$ , средний уклон горизонтальной неровности  $i$ , ‰, определим по формуле

$$i = \frac{C_6/2}{l/4}. \quad (11)$$

В настоящее время нормы содержания рельсовой колеи в процессе эксплуатации отсутствуют. Согласно СТУ<sup>8</sup> допускаемое отклонение в плане на длине хорды 30 м составляет 2 мм для точек, находящихся на расстоянии 5 м. Таким образом, в рамках расчета примем максимальный уклон горизонтальной неровности на пути равным 2 ‰. Критическая длина волны, рассчитанная по формуле (9) для данного отклонения, составляет 4,09 м. Этот уклон соответствует бытовой неровности  $C_6$ , равной 4 мм. В соответствии с результатами расчетов, приведенных на рис. 3, данной неровности соответствует критическая температурная сила  $N_k$  величиной 6771 кН и допускаемое повышение температуры по условию устойчивости  $[\Delta t_y]$  111 °C.

Из этого следует, что расчеты бесстыкового пути на БВСП подтверждают гипотезу о весьма значительном запасе его устойчивости, которая должна быть также проверена в результате натурных испытаний.

**Расчет бесстыкового пути на прочность.** Апробированные методики расчета бесстыкового пути на БВСП с определением допускаемого понижения температуры рельсовой плети относительно температуры закрепления также отсутствуют. В связи с этим расчет бесстыкового пути на прочность выполнен методом конечных элементов.

В расчетную схему вводятся следующие предпосылки и допущения:

1. Выполняется статический расчет, в котором от расчетного колеса на рельс принимается максимальная динамическая вертикальная сила, равная 160 кН (согласно СТУ<sup>9</sup>), а от соседнего колеса — 88,26 кН.
2. Напряжения в рельсах определяются только от действия изгибающего момента.
3. Характеристики БВСП (модуль упругости, жесткости промежуточных рельсовых скреплений, коэффициент постели упругого основания и др.) принимаются детерминированными.
4. Расчет прочности выполнен с учетом действия только вертикальной силы, приложенной к поверхности катания по оси симметрии рельса. Эксцентриситет приложения нагрузки, подуклонка и горизонтальные поперечные силы учитываются коэффициентом  $f$ .
5. Рельсы Р65 представлены одномерным конечным элементом типа «стержень», работающим на изгиб

<sup>8</sup> Специальные технические условия. Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург (ВСЖМ-1). Изменение 1.

<sup>9</sup> Там же.



относительно вертикальной и горизонтальной поперечной оси и с кручением относительно горизонтальной продольной оси.

6. Подрельсовое основание (БВСП) представлено плоскими конечными элементами типа «оболочка», имеющими четыре узла. Между смежными узлами рельсовой плиты и СУБ, СУБ и фундаментной плитой заданы двухузловые упругие связи с вертикальной жесткостью  $S_z = 422,43$  МН/м, вычисленной по результатам расчетов трехмерной конструкции БВСП. Горизонтальная жесткость связей между узлами рельсовой плиты и СУБ, СУБ и фундаментной плитой задана  $S_x = S_y = 0,75$  МН/м.

7. Двухузловые связи между рельсом и рельсовой плитой заданы со следующими жесткостями: вертикальная — 50 МН/м, горизонтальная вдоль плиты — 0,0258 МН/м, горизонтальная поперек плиты — 35 МН/м. Данные связи моделируют реальную жесткость рельсового скрепления.

8. Узлы фундаментной плиты лежат на упругом основании с заданным коэффициентом постели  $C_z = 6,84$  кгс/см<sup>3</sup>, горизонтальная жесткость связей упругого основания принята равной  $S_x = S_y = 0,75$  МН/м.

Расчетная схема, приведенная на рис. 5, представляет собой 3 секции БВСП длиной 16,27 м с расстоянием 20 мм между смежными секциями.

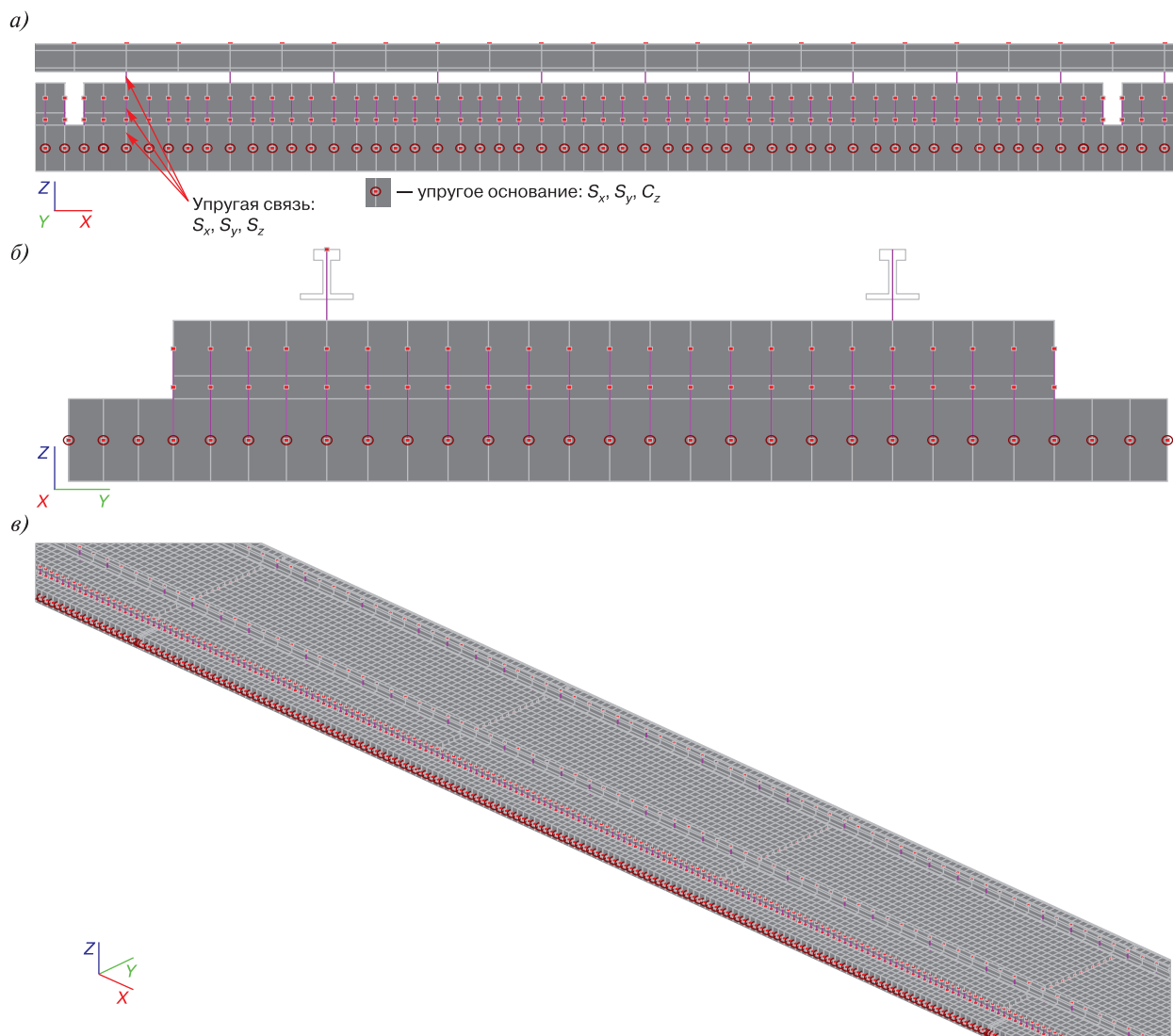


Рис. 5. Расчетная схема для определения напряжений в рельсовых плетях\*:  
 а — продольное сечение; б — поперечное сечение; в — фрагмент конструкции БВСП длиной 16,27 м  
 \* Источник: данные авторов

Fig. 5. Calculation model for determining stresses in rail strings\*:  
 а — longitudinal section; б — cross-section; в — 16.27 m long fragment of ballastless track superstructure  
 \* Source: authors' data

На рис. 6, а представлена форма рельсов, деформированная от воздействия сочетания нагрузок, при котором от расчетного колеса на рельс принимается максимальная динамическая вертикальная сила, равная 160 кН, а от соседнего колеса — 88,26 кН. Полученная форма совпадает с деформированной формой рельсов при расчете традиционной конструкции пути на балласте на прочность. Результаты расчета изгибающих моментов в рельсах приведены на рис. 6, б. Максимальное значение изгибающего момента в рельсах под расчетным колесом составило 3,35 тм, или 32,83 кНм.

Осевые напряжения изгиба и кручения в подошве рельса  $\sigma_o$ , МПа, определяются по формуле<sup>10</sup>:

$$\sigma_o = \frac{M}{W}, \quad (12)$$

где  $M$  — изгибающий момент в рельсах, кНм;

$W$  — момент сопротивления рельса относительно наибольшего удаленного волокна от подошвы, принят равным  $0,000435 \text{ м}^3$ .

Напряжения в кромках подошвы рельса определяются путем умножения на коэффициент перехода от осевых напряжений к кромочным,  $f$ :

$$\sigma_{\text{кп}} = \sigma_o f. \quad (13)$$

Коэффициент  $f$ , согласно методике<sup>11</sup>, для прямых участков составляет 1,25 для электровоза ЭП20, а для электропоезда ЭС2Г — 1,22. Допускаемые динамические напряжения растяжения в кромках подошвы рельсов в прямых и кривых участках, согласно ГОСТ 34759–2021<sup>12</sup>, составляют 240 МПа. Ввиду отсутствия коэффициента  $f$  для высокоскоростных поездов, с целью обеспечения большего запаса прочности в расчетах коэффициент  $f$  принят равным 1,6.

Допускаемое понижение температуры рельсовых плетей  $[\Delta t_p]$ , °С, определяют расчетом прочности рельсов, основанным на условии, что сумма растягивающих напряжений, возникающих от воздействия подвижного состава и изменений температуры, не должна превышать допускаемое напряжение материала рельсов согласно [10]:

$$[\Delta t_p] = \frac{[\sigma] - k_{\text{п}} \sigma_{\text{кп}}}{\alpha E}, \quad (14)$$

где  $[\sigma]$  — допускаемое напряжение в рельсах от совместного действия подвижного состава и температурной силы (для термоупрочненных рельсов  $[\sigma] = 400 \text{ МПа}$ );

$k_{\text{п}}$  — коэффициент запаса прочности, принятый в расчетах равным 1,3.

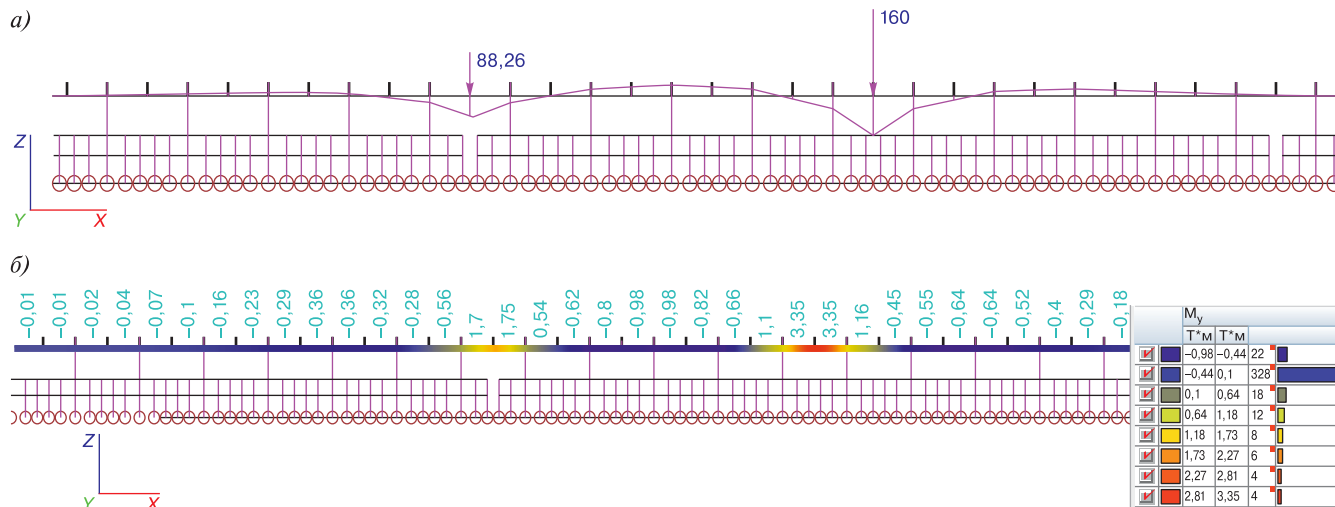


Рис. 6. Изгибающие моменты в рельсах\*:  
а — деформированная форма; б — результаты расчета изгибающих моментов в рельсах  
\* Источник: данные авторов

Fig. 6. Bending moments in rails\*:  
а — deformed shape; б — calculation results of rail bending moments  
\* Source: authors' data

<sup>10</sup> Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утв. расп. ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706/р.

<sup>11</sup> Там же.

<sup>12</sup> ГОСТ 34759–2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 октября 2021 г. № 1068-ст. М.: Российский институт стандартизации. 2021. С. 4.

**Результаты.** По приведенным выше формулам, напряжения изгиба и кручения в кромках подошвы рельса составляют 120,75 МПа, а допускаемое понижение температуры рельсовых плетей по условию прочности относительно температуры закрепления составляет 98 °С.

Расчетная максимальная и минимальная температуры рельсов приняты, например, для станции Тверь, согласно методике<sup>13</sup>, и составляют +66 °С и –50 °С соответственно.

Таким образом, условия укладки бесстыкового пути на БВСП следующие:

- расчетный интервал температуры закрепления рельсовых плетей составляет 93 °С;
- минимальная температура закрепления рельсовых плетей составляет –45 °С;
- максимальная температура закрепления рельсовых плетей составляет +48 °С.

**Обсуждение и заключение.** Предусмотренная проектной документацией конструкция БВСП имеет большой запас устойчивости по сравнению с традиционной конструкцией на балласте. Расчеты показали, что допускаемое повышение температуры по условию устойчивости  $[\Delta t_y]$ , рассчитанное по методике А. Я. Когана, можно принять равным 111 °С. Следовательно, риски нарушения устойчивости бесстыкового пути БВСП в природно-климатических условиях трассы Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1) практически отсутствуют. Однако выдвинутая авторами гипотеза о функции сопротивления рельсовой плети поперечным деформациям должна быть проверена и подтверждена экспериментально.

Выполненные расчеты бесстыкового пути по условию прочности с учетом требуемого нормативными документами неблагоприятного сочетания нагрузок показали, что допускаемое понижение температуры  $[\Delta t_p]$  составляет 98 °С, что сравнимо с традиционной конструкцией пути на балласте.

Таким образом, технические решения конструкции БВСП на бесстрелочных участках, расположенных на земляном полотне, практически исключают риски нарушения механической безопасности как по условию прочности, так и по условию устойчивости.

За счет большей устойчивости бесстыкового пути на БВСП оптимальный интервал температуры закрепления возможно сместить в более низкий диапазон. Однако это может повлечь за собой сложности с техническим обслуживанием бесстыкового пути, связанные с увеличением разницы температуры закрепления и фактической температуры рельсовой плети. Рассчитанная аналитическим методом величина  $[\Delta t_y]$  и путем моделирования величина  $[\Delta t_p]$  должны быть

подтверждены натурными испытаниями в рамках опытной подконтрольной эксплуатации безбалластной конструкции на перегоне Саблино – Тосно и участке Алабушево – Новая Тверь.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Funding:** the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют в финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. Сер. «Труды АО «ВНИИЖТ»». М.: КУНА, 2023. 280 с. EDN: <https://elibrary.ru/mdkaov>.
2. Коган А. Я. *Railway track dynamics and its interaction with rolling stock*. Proceedings of JSC VNIIZHT Series. Moscow: KUNA, 2023. 280 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/mdkaov>.
3. Першин С. П. Методы расчета устойчивости бесстыкового пути // Труды МИИТ. Вып. 147: Путь и путевое хозяйство. М., 1962. С. 28–97.
4. Pershin S. P. Methods for calculating the stability of continuous welded rail (CWR) track. *Proceedings of MIIT. Railway Track and Facilities*. Moscow. 1962;(147):28–97. (In Russ.).
5. Коган А. Я. Продольные силы в железнодорожном пути. Труды ВНИИЖТ. Вып. 332. М.: Транспорт, 1967. 168 с.
6. Коган А. Я. *Longitudinal forces in the railway track*. Proceedings of VNIIZHT. Issue 332. Moscow: Transport, 1967. 168 p. (In Russ.).
7. Крейнис З. Л. О динамической устойчивости рельсового пути // Вестник ЦНИИ МПС. 1963. № 8. С. 58–61.
8. Kreynis Z. L. On the dynamic stability of the railway track. *Herald of TsNI of the Ministry of Railways of the USSR*. 1963;(8):58–61. (In Russ.).
9. Кривободоров А. А. Устойчивость железнодорожного пути при температурном воздействии на рельсы // Труды ЛИИЖТ. Вып. 144. Л., 1952. С. 120–154.
10. Krivobodorov A. A. Stability of the railway track under thermal forces in rails. *Proceedings of LIIZT*. Leningrad. 1952;(144):120–154. (In Russ.).
11. Бромберг Е. М. Устойчивость бесстыкового пути. Труды ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1966. 67 с.
12. Bromberg E. M. *Stability of continuous welded rail track*. Proceedings of VNIIZHT. Moscow: Transport, 1966. 67 p. (In Russ.).
13. Суслов О. А. Определение вероятности выброса бесстыкового пути температурно-напряженного типа // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 4 (46). С. 50–56. EDN: <https://elibrary.ru/swjhpjx>.
14. Suslov O. A. Estimation of probable distortion of a continuous welded track of temperature-strained type. *Volga Region Transport Herald*. 2014;4(46):50–56. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/swjhpjx>.
15. Суслов О. А. Стратегия мониторинга и текущего содержания бесстыкового пути на сети ОАО «РЖД» // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 4 (46). С. 69–73. EDN: <https://elibrary.ru/swjhrl>.
16. Suslov O. A. Strategy of monitoring and routine maintenance of continuous welded rails on the network of JSC «Russian Railways». *Volga Region Transport Herald*. 2014;4(46):69–73. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/swjhrl>.

<sup>13</sup> Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2544/п. С. 167.

9. Суслов О. А., Седелкин Ю. А., Атапин В. В. Анализ устойчивости бесстыкового пути по данным современных средств диагностики // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 11. С. 22–28. EDN: <https://elibrary.ru/vbckzp>.

Suslov O. A., Sedelkin Yu. A., Atapin V. V. Analysis of continuous welded rail track stability based on data from modern diagnostic tools. *Railway Track and Facilities*. 2015;(11):22–28. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vbckzp>.

10. Strauss A., Šomodíková M., Lehký D., Novák D., Bergmeister K. Nonlinear finite element analysis of continuous welded rail–bridge interaction: monitoring-based calibration. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2018;24(4):344–354. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.3050>.

11. N.-H. Lim, N.-H. Park, Yo.-J. Kang. Stability of continuous welded rail track. *Computers & Structures*. 2003;81(22–23):2219–2236. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00287-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00287-6).

12. Альбрехт В. Г., Коган А. Я. и др. Бесстыковой путь. М.: Транспорт, 2000. 408 с.

Albrecht V. G., Kogan A. Ya. et al. *Welded rail track*. Moscow: Transport, 2000. 408 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Андрей Валерьевич РОМАНОВ,

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Железнодорожный путь», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), SPIN-код: 6385-3293, <https://orcid.org/0000-0002-8071-8594>

### Артём Александрович КИСЕЛЕВ,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Железнодорожный путь», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), SPIN-код: 8734-4325, <https://orcid.org/0000-0001-7088-8824>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Andrei V. ROMANOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Railway Track Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave.), SPIN-code: 6385-3293, <https://orcid.org/0000-0002-8071-8594>

### Artyom A. KISELEV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Railway Track Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave.), SPIN-code: 8734-4325, <https://orcid.org/0000-0001-7088-8824>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Андрей Валерьевич РОМАНОВ.** Постановка целей и задач исследования, анализ состояния вопроса, расчет бесстыкового пути на устойчивость, оценка результатов исследования, формулирование выводов, написание текста статьи (50 %).

**Артём Александрович КИСЕЛЕВ.** Постановка целей и задач исследования, анализ состояния вопроса, расчет бесстыкового пути на прочность, оценка результатов исследования, формулирование выводов, написание текста статьи (50 %).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Andrei V. ROMANOV.** Research aims and objectives formulation, analysis of research state, stability analysis of continuous welded rail track, evaluation of research results, conclusion formulation, article text writing (50 %).

**Artyom A. KISELEV.** Research aims and objectives formulation, analysis of research state, strength analysis of continuous welded rail track, evaluation of research results, conclusion formulation, article text writing (50 %).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию 09.09.2025, рецензия от первого рецензента получена 19.09.2025, рецензия от второго рецензента получена 24.09.2025, рецензия от третьего рецензента получена 07.10.2025, принята к публикации 09.10.2025.

The article was submitted 09.09.2025, first review received 19.09.2025, second review received 24.09.2025, third review received 07.10.2025, accepted for publication 09.10.2025.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 621.3.051.25

EDN: <https://elibrary.ru/zvkmqv>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-273-286>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



## Эффективность совместной работы устройств обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ и железнодорожной автоматики и телемеханики на грузонапряженных участках железных дорог

А. А. Крылов✉, А. Б. Косарев

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для Восточного полигона железных дорог России, охватывающего Забайкальскую и Дальневосточную железные дороги, характерна повышенная грузонапряженность с ожидаемым ростом в ближайшей перспективе. Работа устройств тягового электроснабжения на отдельных участках связана с высокой токовой нагрузкой, в том числе в обратной тяговой сети. Необходимы особые меры по защищенности сети и сохранению ее работоспособности.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования выбран участок Розенгартовка – Бойцово – Бикин Дальневосточной железной дороги для оценки влияния совместной работы устройств обратной тяговой сети и железнодорожной автоматики и телемеханики. Участок расположен на главном электрифицированном ходу Транссибирской магистрали с электротягой переменного тока напряжением 25 кВ. Был проведен сравнительный анализ эффективности применения мероприятий, наиболее значимых с точки зрения степени воздействия на повышение защищенности устройств железнодорожной автоматики и телемеханики при совместной работе с обратной тяговой сетью переменного тока напряжением 25 кВ.

**Результаты.** Определены параметры работы обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ на исследуемом участке. Оценены факторы взаимного влияния на параметры работоспособности в условиях реального движения поездов повышенной массы, возникающие в работе обратной тяговой сети, и степени их влияния на работоспособность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

**Обсуждение и заключение.** По результатам проведенных исследований на участке Дальневосточной железной дороги приведены доказательства о возможности повышения пробивного напряжения коммутирующих устройств до 2500 В. Разработаны и классифицированы технические мероприятия по минимизации воздействия режимов обратной тяговой сети переменного тока на работоспособность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики с оценкой достигаемого эффекта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железная дорога, система внешнего электроснабжения, система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, потеря электроэнергии, несимметрия напряжения, входное сопротивление, нормальная схема питания тяговых нагрузок

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Крылов А. А., Косарев А. Б. Эффективность совместной работы устройств обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ и железнодорожной автоматики и телемеханики на грузонапряженных участках железных дорог // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 273–286. EDN: <https://elibrary.ru/zvkmqv>.



Original article

UDK 621.3.051.25

EDN: <https://elibrary.ru/zvkmqv>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-273-286>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



## Efficiency of joint operation of 25 kV reverse traction AC network devices and railway automation and telemechanics on heavy-load railway sections

Anton A. Krylov✉, Alexander B. Kosarev

Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The Eastern Polygon, which covers Trans-Baikal and Far Eastern Russian railways, is characterised by increased freight traffic with an expected growth in the near future. The operation of traction power supply devices in certain areas is associated with a high current load, including reverse traction network. Special measures are required to secure the network and keep it operational.

**Materials and methods.** Rosengartovka – Boytsovo – Bikin section of the Far Eastern Railway was chosen as the research object to assess the impact of joint operation of reverse traction AC network devices and railway automation and telemechanics. The section is located on the main electrified course of the Trans-Siberian railway with an AC traction with 25 kV voltage. Comparative analysis of the effectiveness of the most significant measures in terms of impact on improving the security of railway automation and telemechanics devices was carried out when working with a 25 kV reverse traction AC network.

**Results.** The operation parameters of reverse traction AC network with 25 kV voltage in the study area were determined. The factors of mutual influence on the performance parameters in conditions of real movement of heavy-load trains arising in the operation of the reverse traction network and the degree of their influence on the performance of railway automation and telemechanics devices are estimated.

**Discussion and conclusion.** According to the results of the research conducted on the section of the Far Eastern Railway, evidence is provided on the possibility of increasing the critical voltage of switching devices up to 2500 V. Technical measures were developed and classified to minimise the impact of 25 kV reverse traction network modes on the operational performance of railway automation and telemechanics devices, indicating the degree of their impact and evaluating the achieved effect.

**KEYWORDS:** railway, external power supply, traction power supply system, traction substation, electric power loss, voltage unbalance, input impedance, standard traction load power supply circuit

**FOR CITATION:** Krylov A. A., Kosarev A. B. Efficiency of joint operation of 25 kV reverse traction AC network devices and railway automation and telemechanics on heavy-load railway sections. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):273–286. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-273-286>.

**Введение.** На сегодняшний день перед транспортной отраслью Российской Федерации и ОАО «РЖД» поставлена задача увеличения пропускной и провозной способности полигонов железных дорог в направлении основных портов Дальнего Востока для возможности увеличения объемов экспорта и валового внутреннего продукта<sup>1</sup>. Выполнение данных задач достигается за счет увеличения количества пар поездов, перевозящих грузы в направлении морских портов Дальнего Востока, увеличения весовых норм поездов и необходимости обращения поездов повышенной массы (сдвоенных поездов) с учетом дефицита возможности провозной способности и существующих барьерных ограничений по инфраструктуре Восточного полигона, в том числе в границах Забайкальской и Дальневосточной железных дорог. С учетом наличия данных факторов, в границах указанных железных дорог применяются особые условия и требования, предъявляемые к надежности и эффективности работы устройств тягового электроснабжения и железнодорожной автоматики и телемеханики (далее — ЖАТ), реализуются мероприятия по их усилению и модернизации, обеспечивающие надежность перевозочного процесса. Вышеуказанные полигоны железных дорог по своим параметрам и специфике работы являются наиболее грузонапряженными на всей сети железных дорог ОАО «РЖД». Воздействие эксплуатационных и аварийных режимов с повышенными токовыми нагрузками, возникающими в обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ, на устройства ЖАТ потребуют особых условий для их защищенности, сохранения работоспособности и повышения эффективности в данных условиях эксплуатации.

Наличие указанных выше факторов и критериев привело к необходимости исследовать электромагнитные процессы при работе обратной тяговой сети переменного тока совместно с устройствами ЖАТ [1] для минимизации рисков возникновения аварийных режимов и снижения отказов технических средств на грузонапряженных участках железных дорог. Последнее особенно важно при организации тяжеловесного движения поездов вследствие влияния тягового тока, протекающего в обратной тяговой сети в момент движения электрического подвижного состава (далее — ЭПС), а также токов повышенной амплитуды, возникающих в аварийных режимах, в том числе при влиянии атмосферных и коммутационных перенапряжений. Одной из важнейших характеристик электромагнитных процессов является электромагнитная совместимость, рассмотренная в работе [2]. Авторами был разработан алгоритм, позволяющий проанализи-

ровать характеристики электромагнитной совместимости, а также была обоснована методика расчета коммутационных перенапряжений, в том числе и при разряде токов молнии в контактную сеть системы электроснабжения с высоковольтным питающим проводом. Установлено, что защита напольных устройств сигнализации, централизации и блокировки (далее — СЦБ) от коммутационных перенапряжений в системе электроснабжения с высоковольтным питающим проводом может быть решена соединением опор контактной сети с протяженным заземлителем, расположенным в земле и не соединенным с рельсовым путем.

Дополнительно в работе [3] был обоснован метод расчета коммутационных перенапряжений, включая разряд токов молнии в контактную сеть и высоковольтный силовой провод, для изоляции контактной сети в системе электроснабжения. Защита устройств наружной СЦБ от коммутационных перенапряжений в системе электроснабжения с высоковольтным силовым проводом может быть решена путем подключения арматуры опорных фундаментов контактной сети к протяженному искусственному заземлителю, который расположен под землей и не соединен с железнодорожным полотном [3]. В работе<sup>2</sup> изучены методы электрического расчета тяговых сетей, проведено натурное моделирование электромагнитных процессов в тяговых сетях для основных расчетных режимов работы устройств электроснабжения и электропоездов. На основании изложенного был предложен ряд практических решений по обеспечению электробезопасности при эксплуатации и ремонте тяговых сетей, а также при капитальном ремонте пути на двухпутных участках переменного тока. Исходя из этих выводов, в [4] разработана методика расчета сопротивлений тяговых сетей переменного тока.

В 2014 г. сотрудниками дорожной лаборатории Свердловской железной дороги и Уральского государственного университета путей сообщения было проведено научное исследование в области совершенствования эксплуатации и повышения надежности работы рельсовых цепей. В итоговой монографии [5] были представлены результаты внедрения этих разработок на Свердловской железной дороге в условиях пониженного сопротивления изоляции рельсовых цепей и повышенных тяговых токов при электротяге постоянного тока. Дополнительно рассмотрены процессы и закономерности изменения сопротивления изоляции рельсовых цепей, сопротивления токопроводных стыков, а также сведения об объективных критериях и методах количественной оценки эксплуатационных свойств рельсовых цепей. Представлена новая система оптимальной регулировки рельсовых цепей [5].

<sup>1</sup> Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. 285 с.

<sup>2</sup> Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока: производств. изд. М.: Транспорт, 1987. 279 с.

На основании выполненного анализа предложены следующие механизмы работы системы тягового железнодорожного электроснабжения (далее — СТЭ): нормальный, вынужденный и аварийный. В работе [6] были рассмотрены режимы работы СТЭ с целью развития и совершенствования автоматизированных средств определения режимов работы и расчета параметров СТЭ, с контролем наличной пропускной способности железной дороги по тяговому электроснабжению и снятием инфраструктурных ограничений. Кроме этого, изучение данного вопроса позволит проверить гипотезу о возможности повышения уровня пробивного напряжения коммутирующих устройств до 2500 В.

**Материалы и методы.** В нормальном режиме работы СТЭ закон распределения потенциалов между рельсом и землей носит вероятностно-статистический характер, поскольку зависит от количества, массы и координат местонахождения поездов, находящихся в пределах межподстанционной зоны (далее — МПЗ). Для обеспечения нормального функционирования устройств регулирования движения и элементов СТЭ необходимо, чтобы токи и потенциалы не превышали установленных для данных элементов допустимых значений. При переменном токе разность потенциалов между рельсом и землей может превышать 1400–1500 В, что недопустимо как по условиям нормального функционирования СТЭ, СЦБ и ЖАТ и обеспечения безопасности движения, так и по условиям электробезопасности для обслуживающего персонала и пассажиров [7]. Также исследования по данному вопросу описаны в работе [8], где изучено влияние переходного сопротивления балласта верхнего строения пути на величину потенциала «рельс — земля».

С ростом массы поездов, в случае если длина МПЗ и расстояние между тяговыми подстанциями (далее — ТП) остаются неизменными, то среднее значение потенциала между рельсом и землей в пределах этой МПЗ в нормальном режиме работы СТЭ возрастает пропорционально токовым нагрузкам, т.е. наличию на участке одного или нескольких ЭПС (рис. 1).

Результаты расчета потенциалов между рельсом и землей для основной гармоники тока ( $f = 50$  Гц) на однопутном и двухпутном участках при наличии трех единиц ЭПС и двустороннем питании МПЗ представлены в виде графиков на рис. 2 и 3.

Из этого следует, что потенциалы между рельсом и землей для двухпутных участков железных дорог ниже, чем для однопутного участка [9].

Наиболее тяжелым вынужденным режимом работы СТЭ является режим ее работы при отключении (аварийном или плановом) одной из ТП. В этом случае длина МПЗ увеличивается примерно вдвое, что приводит к увеличению потерь напряжения на токоприемниках электропоездов и уменьшению уровня напряжения на них, а также к увеличению потерь мощности в тяговой сети. Возрастают токи тех фидеров ТП, которые питают возникшую протяженную МПЗ. Увеличивается нагрузка ТП, питающих удлиненную МПЗ<sup>3</sup>.

К вынужденному режиму работы СТЭ относится и отключение поста секционирования, который, как правило, расположен в средней части МПЗ. В результате вместо двусторонней схемы питания образуются две зоны с односторонним питанием. Это приводит к увеличению потерь напряжения и мощности в тяговой сети и уменьшению напряжения на токо-

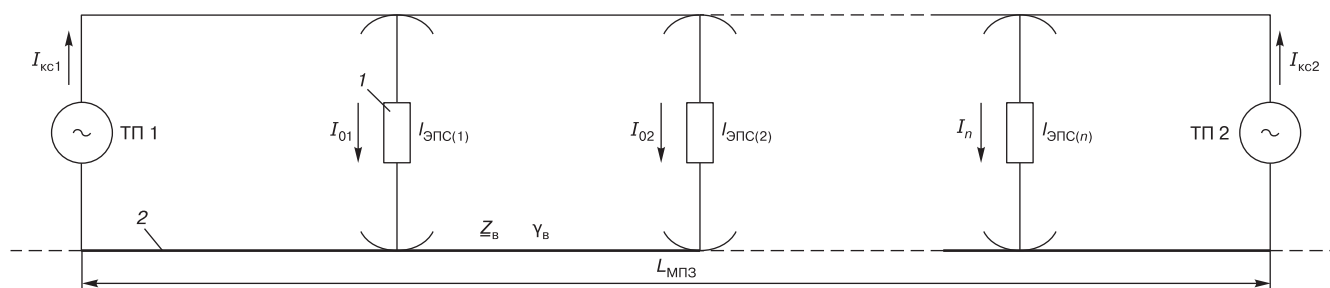


Рис. 1. Схема расчета потенциалов рельсов при двустороннем питании и произвольном количестве нагрузок\*:  
 $I$  — нагрузка (ЭПС); 2 — рельсы;  $I_{01}...I_n$  — токи ЭПС;  $l_{ЭПС(1)}...l_{ЭПС(n)}$  — расстояния  $i$ -го ЭПС от ТП 1;  $L_{МПЗ}$  — длина МПЗ;  
 $Z_B$  — волновое сопротивление рельсовой сети;  $\gamma_B$  — коэффициент распространения рельсовой сети, 1/км;  
 $I_{кк1}$  — ток в контактной сети от ТП 1;  $I_{кк2}$  — ток в контактной сети от ТП 2

\* Источник: [11]

Fig. 1. Calculation scheme of rail potentials with two-way power supply and arbitrary number of loads\*:

$I$  — load (electric rolling stock); 2 — rails;  $I_{01}...I_n$  — electric rolling stock currents;  $l_{ЭПС(1)}...l_{ЭПС(n)}$  — distance between  $i$ -th electric rolling stock and traction substation 1;  $L_{МПЗ}$  — inter-substation zone length;  $Z_B$  — rail network wave impedance;  $\gamma_B$  — rail network distribution coefficient, 1/km;  
 $I_{кк1}$  — current in catenary system from traction substation 1;  $I_{кк2}$  — current in catenary system from traction substation 2

\* Source: [11]

<sup>3</sup> Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1982. 528 с.

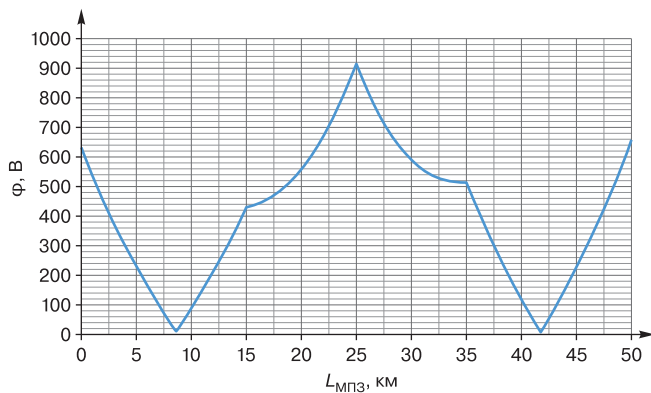


Рис. 2. Потенциалы между рельсом и землей для однопутного участка при трех ЭПС в пределах МПЗ\*  
\* Источник: данные авторов

Fig. 2. Potentials between rail and ground for a single-track section of three electric rolling stocks within the inter-substation zone\*  
\* Source: authors' data

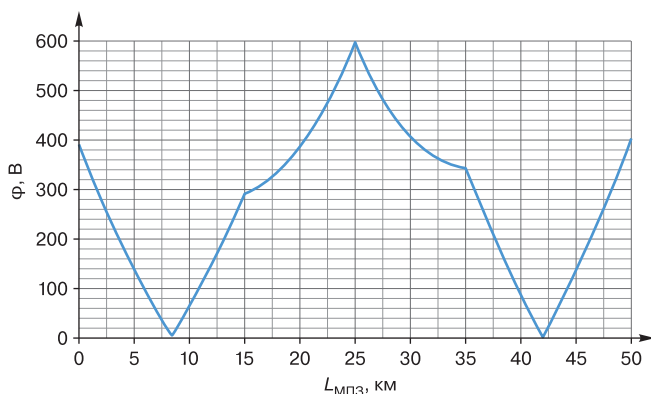


Рис. 3. Потенциалы между рельсом и землей для двухпутного участка при трех ЭПС в пределах МПЗ\*  
\* Источник: данные авторов

Fig. 3. Potentials between rail and ground for two-track section with three electric rolling stocks within the inter-substation zone\*  
\* Source: authors' data

приемниках. За счет включения нормально разомкнутых продольных разъединителей контактной сети (далее — КС), расположенных в зоне поста секционирования, можно обеспечить двустороннее питание КС на рассматриваемой МПЗ. Но при этом будут иметь место достаточно протяженные «мертвые» зоны токовой защиты, установленной на фидерах ТП.

Расчетная схема определения потенциала рельсов от тока ЭПС в вынужденном режиме при одной нагрузке и одной ТП в пределах МПЗ представлена на рис. 4.

Результаты расчета потенциалов рельсов [10] на однопутном и двухпутном участках в вынужденном режиме при трех ЭПС от основной гармоники тока ( $f = 50$  Гц) представлены в виде графика на рис. 5 и 6.

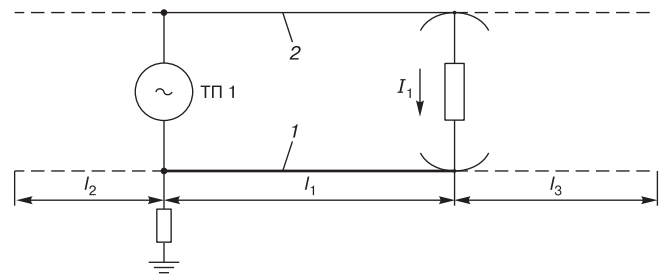


Рис. 4. Схема расчета потенциалов рельсов в вынужденном режиме\*:  
 $l$  — рельс; 2 — контактная сеть;  $l_1$  — расстояние от ТП до  $i$ -го ЭПС;  $l_2$  — расстояние до ТП;  $l_3$  — расстояние от ЭПС;  $I_1$  — ток ЭПС  
\* Источник: данные авторов

Fig. 4. Calculation scheme of rail potentials in forced mode\*:  
 $l$  — rail; 2 — catenary system;  $l_1$  — distance between traction substation and  $i$ -th electric rolling stock;  $l_2$  — distance to traction substation;  $l_3$  — distance from electric rolling stock;  $I_1$  — electric rolling stock current  
\* Source: authors' data

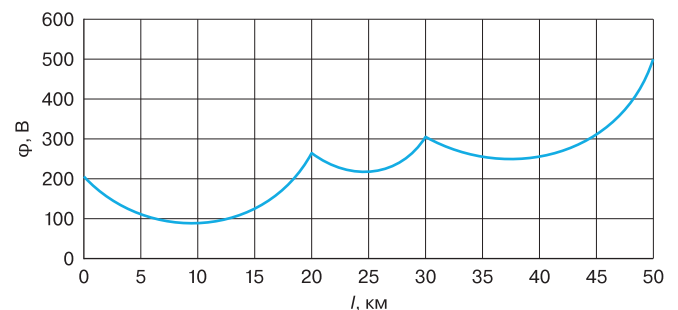


Рис. 5. Распределение потенциалов рельсов на однопутном участке в вынужденном режиме при трех ЭПС в пределах МПЗ\*  
\* Источник: данные авторов

Fig. 5. Distribution of rail potentials on a single-track section in forced mode with three electric rolling stocks within the inter-substation zone\*  
\* Source: authors' data

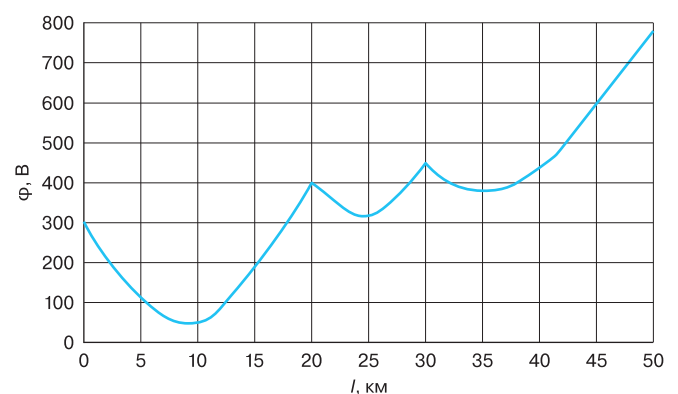


Рис. 6. Моделирование распределения потенциалов рельсов на двухпутном участке в вынужденном режиме при трех ЭПС в пределах МПЗ\*  
\* Источник: данные авторов

Fig. 6. Simulation of the distribution of rail potentials on a double-track section in forced mode with three electric rolling stocks within the inter-substation zone\*  
\* Source: authors' data



Таким образом, работа СТЭ в вынужденном режиме оказывает незначительное влияние на процесс возникновения повышенных потенциалов между рельсом и землей, что объясняется наличием контуров заземления на ТП, в том числе на отключенных, которые не способствуют формированию повышенных потенциалов. В случае короткого замыкания (далее — КЗ) на рельс в системе переменного тока, направление тока КЗ совпадает с направлением тока тягового режима. Влияние индуктивности рельсов приводит к отличию характера изменения потенциала рельсов в переходном процессе. На участках электротяги переменного тока выделяют три периода формирования потенциала между рельсом и землей в точке КЗ:

- рост потенциала обусловлен увеличением силы тока КЗ;
- изменение потенциала при отключении КЗ автоматическим выключателем в ТП. В момент разрыва цепи выключателем в рельсах возникает напряжение, которое поддерживает ток КЗ и вызывает появление тока самоиндукции, циркулирующего по замкнутому контуру «рельс — земля — рельс»;
- снижение потенциала, вызванное ослаблением тока самоиндукции.

Когда КЗ получает питание от двух ТП, это изменяет как характер тока в точке КЗ, так и распределение потенциала между рельсом и землей (рис. 7). Наиболее типичная ситуация для режима КЗ возникает, когда оно совпадает с нахождением поезда в зоне питания, работающего в тяговом режиме. В этом случае тяговые двигатели электроваза переключаются на генераторный режим и дополнительно питают место КЗ. В то время как отключение тока ТП занимает 0,05–0,1 с, генераторный режим электроваза продлевает ток в точке КЗ до 0,3–0,6 с.

При КЗ потенциалы обеих полярностей могут достигать нескольких сотен вольт. На рельсах участков с переменным током при КЗ контактной сети были зафиксированы напряжения до 1,5 кВ.

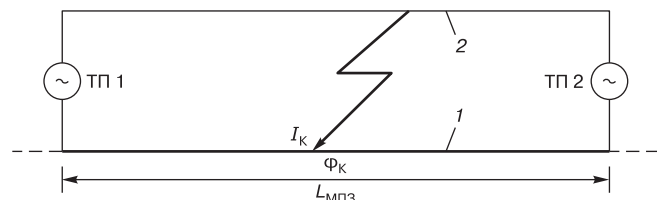


Рис. 7. Схема расчета максимального потенциала рельсов при КЗ и двустороннем питании МПЗ\*:

1 — рельсовая сеть; 2 — контактная сеть;  $I_K$  — ток КЗ;  
 $\phi_K$  — потенциал между рельсом и землей в точке КЗ

\* Источник: данные авторов

Fig. 7. Calculation scheme of rails maximum potential in case of short circuit and two-way power supply of the inter-substation zone\*:

1 — rail network; 2 — catenary system;  $I_K$  — short-circuit current;  
 $\phi_K$  — rail-to-earth potential in short-circuit point

\* Source: authors' data

По результатам моделирования (рис. 8 и 9) можно сделать вывод, что в режиме КЗ при величине переходного сопротивления  $R_{\Pi} = 5 \text{ Ом} \cdot \text{км}$  наблюдается

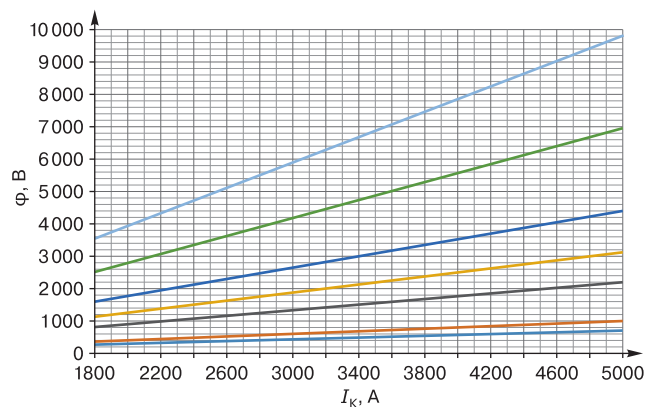


Рис. 8. Влияние переходного сопротивления и тока КЗ однопутного участка на максимальный рельсовый потенциал при двустороннем питании МПЗ\*:

— 0,5 Ом·км; — 1 Ом·км; — 5 Ом·км; — 10 Ом·км;  
 — 20 Ом·км; — 50 Ом·км; — 100 Ом·км

\* Источник: данные авторов

Fig. 8. Influence of the transient resistance and short-circuit current of a single-track section on the maximum rail potential with inter-substation zone two-way power supply\*:

— 0,5 Ohm·km; — 1 Ohm·km; — 5 Ohm·km;  
 — 10 Ohm·km; — 20 Ohm·km; — 50 Ohm·km;  
 — 100 Ohm·km

\* Source: authors' data

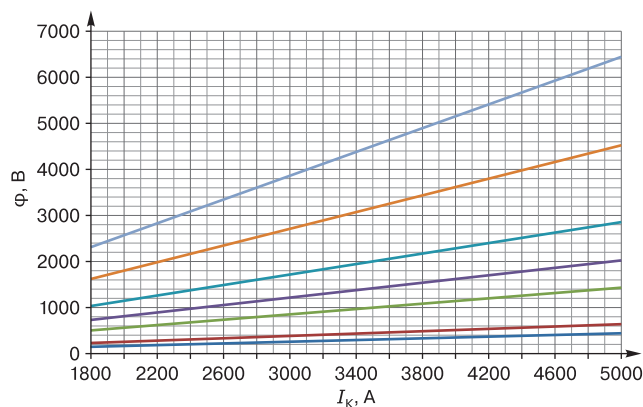


Рис. 9. Влияние переходного сопротивления и тока КЗ на максимальный уровень потенциала рельсов в условиях двухпутного участка, питаемого с двух сторон магистральной питающей заземляющей сетью МПЗ\*:

— 0,5 Ом·км; — 1 Ом·км; — 5 Ом·км; — 10 Ом·км;  
 — 20 Ом·км; — 50 Ом·км; — 100 Ом·км

\* Источник: данные авторов

Fig. 9. Influence of transient resistance and short-circuit current on the maximum rail potential level in conditions of a double-track section powered from both sides by the inter-substation main supply grounding network\*:

— 0,5 Ohm·km; — 1 Ohm·km; — 5 Ohm·km;  
 — 10 Ohm·km; — 20 Ohm·km; — 50 Ohm·km;  
 — 100 Ohm·km

\* Source: authors' data

повышенная величина потенциалов, которая может привести к пробоем искрового промежутка и дальнейшему стеканию части тока КЗ в цепи устройств ЖАТ и конструкции инфраструктуры, имеющие гальваническую связь с землей. Негативным последствием может быть отказ в работе устройств ЖАТ вследствие термического воздействия токов КЗ.

**Результаты исследования.** По данным работы СТЭ на режимах (нормальном, вынужденном и аварийном) были разработаны мероприятия, способствующие повышению надежности и эффективности совместной работы обратной тяговой сети и устройств ЖАТ на грузонапряженных участках железных дорог по критерию прямого или косвенного воздействия, приведенные в табл. 1.

Следует отметить, что прямое воздействие — это воздействие низкого, среднего или высокого уровня, направленное непосредственно на снижение влияния разности потенциалов между рельсом и землей на функционирование систем и устройств ЖАТ. Косвенное воздействие — это воздействие низкого, среднего или высокого уровня, направленное на снижение разности потенциалов между рельсом и землей, включая параметры, изменение которых приводит к снижению разности потенциалов.

На основе данных из табл. 1 были проведены исследования на участке Розенгартовка — Бойцово — Бикин Дальневосточной железной дороги [11]. Этот двухпутный участок протяженностью 42,15 км расположен на главном электрифицированном ходу Транссибирской магистрали с электротягой переменного тока напряжением 25 кВ. Структурно находится в составе межподстанционной зоны Розенгарт

товка — Бикин. Весовые нормы поездов в четном направлении составляют 6300, 7200, 12 000, 14 000 т, скорость ограничена до 70–80 км/ч. Фидеры контактной сети тяговой подстанции Розенгартовка подключаются в точке с координатой 8713,68 (рис. 10). Пост секционирования контактной сети расположен на станции Бойцово.

На участке уложены рельсы типа Р65, движение грузовых поездов осуществляется электровозами ЗЭС5К «Ермак».

Проведен сравнительный анализ эффективности применения наиболее значимых с точки зрения степени воздействия на повышение защищенности устройств ЖАТ мероприятий при совместной работе с обратной тяговой сетью переменного тока напряжением 25 кВ.

Рассмотрим подробнее результаты, полученные в ходе исследования.

**Заземление средней точки ДТ.** К средним точкам путевых ДТ могут быть подключены различного рода заземляющие устройства, необходимые для нормального функционирования устройств тягового электроснабжения. В целях снижения потенциала между рельсом и землей на действующих участках возможно подключение контуров заземления к средним точкам ДТ. Результаты измерений потенциала рельсов относительно земли были получены в феврале 2023 года на участке Розенгартовка — Бойцово — Бикин для оценки влияния подключения заземления к средним точкам ДТ.

Схема подключения измерительных каналов регистратора при подключенном контуре заземления к средней точке ДТ представлена на рис. 11.

Результаты исследования представлены на рис. 12.

Таблица 1

**Перечень технических мероприятий для повышения эффективности совместной работы обратной тяговой сети и устройств ЖАТ на грузонапряженных участках железных дорог\***

Table 1

**Classification of technical measures of improving the efficiency of the joint operation of the reverse traction network and railway automation and telemechanics devices on heavy-load railway sections\***

№ п/п	Наименование мероприятия	Место применения	Воздействие			Получаемый эффект
			Прямое	Косвенное	Уровень	
1	Заземление средней точки дроссель-трансформатора (далее — ДТ)	На действующих участках		+	Средний	При подключении отдельно сделанных вынесенных контуров заземления к междупутным перемычкам потенциалы между рельсом и землей уменьшаются
2	Применение в цепях заземления опор КС элементов с повышенным статическим напряжением пробоя	На действующих участках	+		Высокий	Снижение количества отказов систем и устройств ЖАТ

\* Источник: данные авторов

\* Source: authors' data

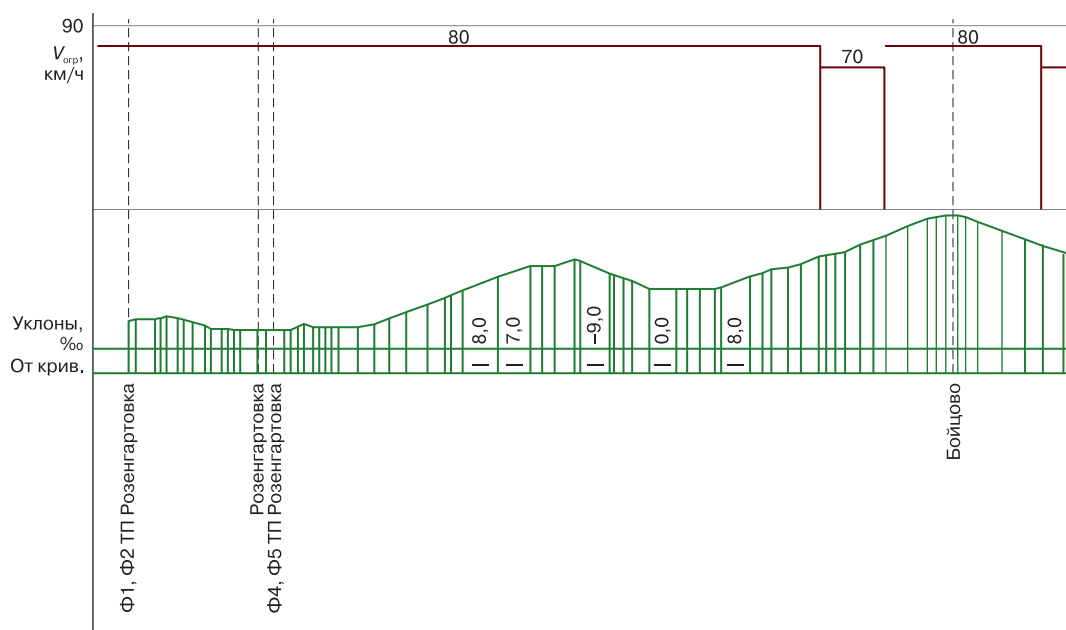


Рис. 10. Продольный профиль участка Розенгартовка – Бойцово

\* Источник: данные авторов

Fig. 10. Rosengartovka – Boitsovo section

\* Source: authors' data

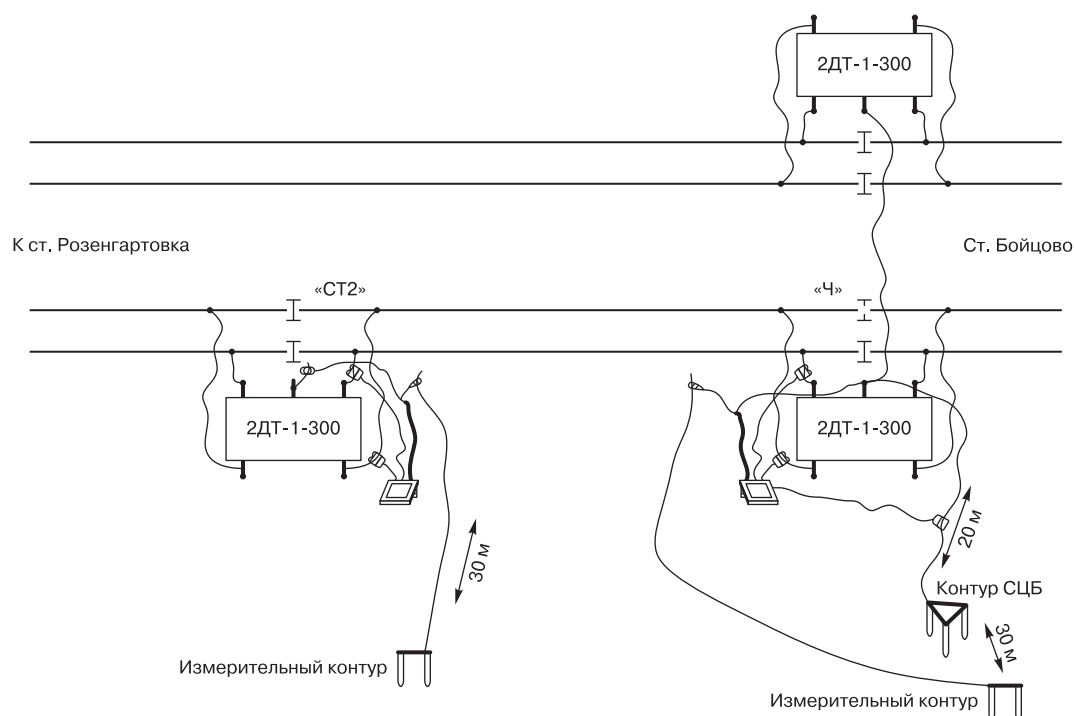


Рис. 11. Схема подключения измерительных каналов регистратора при подключенном контуре заземления к средней точке ДТ\*:

СТ2 — сигнальная точка перегона Розенгартовка – Бойцово; «Ч» — сигнальная точка станции Бойцово

\* Источник: данные авторов

Fig. 11. Connection diagram of the measuring channels of the recorder with the ground network connected to the midpoint of impedance transformer\*:

СТ2 — signal point of the Rosengartovka – Boitsovo proving ground; «Ч» — signal point of the Boitsovo station

\* Source: authors' data

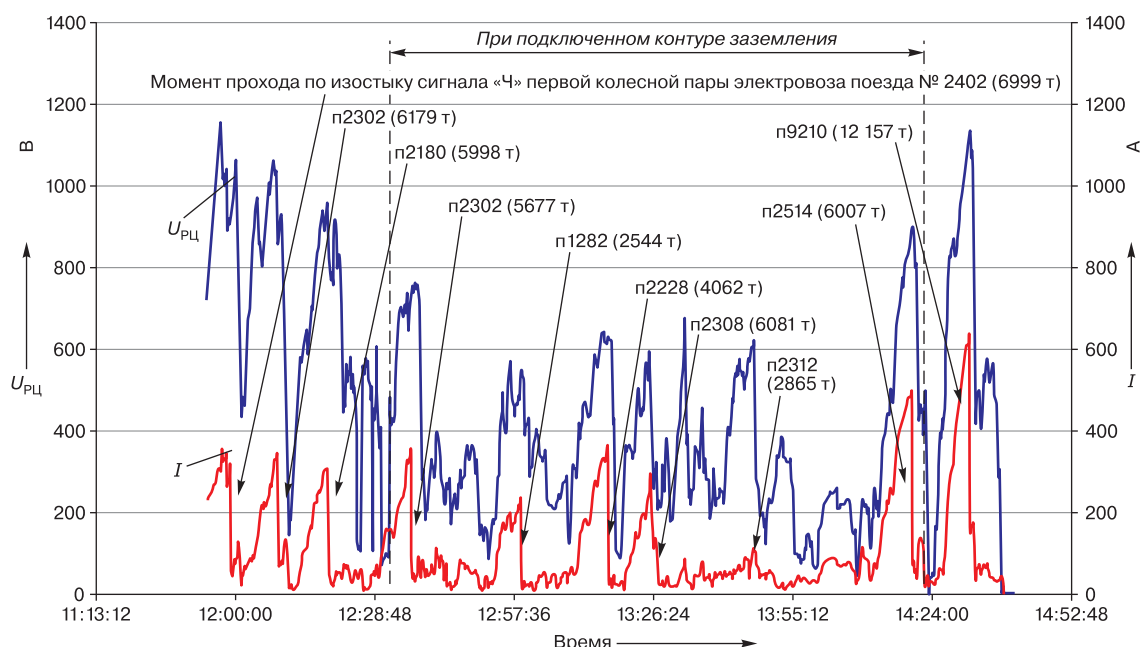


Рис. 12. График напряжения РЦ ( $U_{PC}$ ) и суммарного тока со стороны перегона ( $I$ ) на ДТ на сигнальной точке «Ч»\*  
\* Источник: данные авторов

Fig. 12. Graph of the rail circuit voltage ( $U_{PC}$ ) and the total current from the proving ground ( $I$ ) on the DT at the signal point «Ч»\*  
\* Source: authors' data

Как видно из графика, время начала измерения — 12:00, а окончания — 14:40 (табл. 2).

В 12:30 были подключены отдельно вынесенные контуры заземления к междупутным перемычкам

Таблица 2

Расшифровка графика напряжения РЦ и суммарного тока (со стороны перегона) на ДТ на сигнальной точке «Ч»\*

Table 2

Decoding of the rail circuit voltage graph and the total current (from the proving ground) on the impedance transformer at the signal point «Ч»\*

№ п/п	Время	Номер поезда	Масса, т	$I$ , А	$U_{PC}$ , В
1	12:00	2402	6999	350	1180
2	12:10	2302	6179	340	1050
3	12:20	2180	2180	300	950
4	12:40	2306	5677	350	780
5	12:57	1282	2544	210	550
6	13:10	2228	4062	350	610
7	13:26	2308	6081	300	600
8	13:40	2312	2865	100	605
9	14:10	2514	6007	500	900
10	14:35	9210	12 157	610	1175

\* Источник: данные авторов

\* Source: authors' data

(начало испытаний). Время окончания испытаний — 14:24. В результате исследований выявлено, что при подключении контуров заземления к междупутным перемычкам потенциалы между рельсом и землей снижаются на 30–35 %. Полученные результаты исследования представлены на рис. 12.

Из результатов видно, что заземление средней точки ДТ не решает вопросов требований электробезопасности. Использование земли в качестве обратного провода в тяговых сетях переменного тока предопределяет наличие конструктивных особенностей заземляющей системы подстанций, которая одновременно является цепью отсоса. В результате этот контур заземления является не только защитным, но и рабочим элементом, по которому постоянно протекает обратный ток.

*Применение в цепях заземления опор КС элементов с повышенным статическим напряжением пробоя.* Выбор способа заземления может быть определен рядом требований, исходящих из реальной величины сопротивления каждого из заземляемых устройств. На участках переменного тока искровые промежутки устанавливаются в индивидуальные заземления при сопротивлении опор менее 100 Ом и при подключении к рельсу двухниточной РЦ и менее 5 Ом — при подключении к средней точке ДТ<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: приказ Министерства транспорта РФ от 23 июня 2022 г. № 250. 84 с.

Защитные устройства в цепи заземления должны обеспечивать надежную работу защит от токов КЗ, электробезопасность обслуживающих работников и других лиц и способствовать нормальному функционированию устройств ЖАТ и РЦ, а на участках постоянного тока ограничивать утечки тяговых токов в землю.

В нормальном режиме работы заземляемая конструкция и рельсы изолированы друг от друга. Они должны соединяться, только когда защитное устройство в цепи заземления оказывается под предельным напряжением и пробивается. При достижении установленного значения приложенного напряжения ток течет через защитное устройство. Таким образом, в защищаемых устройствах ограничивается перенапряжение.

Известно, что на железнодорожных участках переменного тока при самых неблагоприятных условиях (хорошая изоляция балластного слоя пути, обращение тяжеловесных поездов, значительная длина МПЗ, вынужденные режимы работы СТЭ и т.д.) потен-

циал между рельсом и землей может достигать 1700–1800 В<sup>5</sup>.

По данным, представленным на рис. 13 и 14, наибольший потенциал между рельсом и землей был выявлен на сигнальной точке № 4 перегона Розенгартовка – Бойцово [12].

Как видно из рис. 14, существенные различия амплитудного и действующего значения напряжения между рельсом и землей объясняются наличием высших гармоник тягового тока.

График напряжения между рельсом и землей для поезда № 9218 весом 14 086 т приведен на рис. 15.

На рис. 16 и 17 приведены потенциальные диаграммы, построенные по результатам замеров значений напряжений между рельсом и землей на сигнальной точке комплектной трансформаторной подстанции, расположенной вдоль линии «два провода – рельс» и сигнальных точек «Ч» и № 4 при движении сдвоенного поезда повышенной массы № 9218 весом 14 086 т.

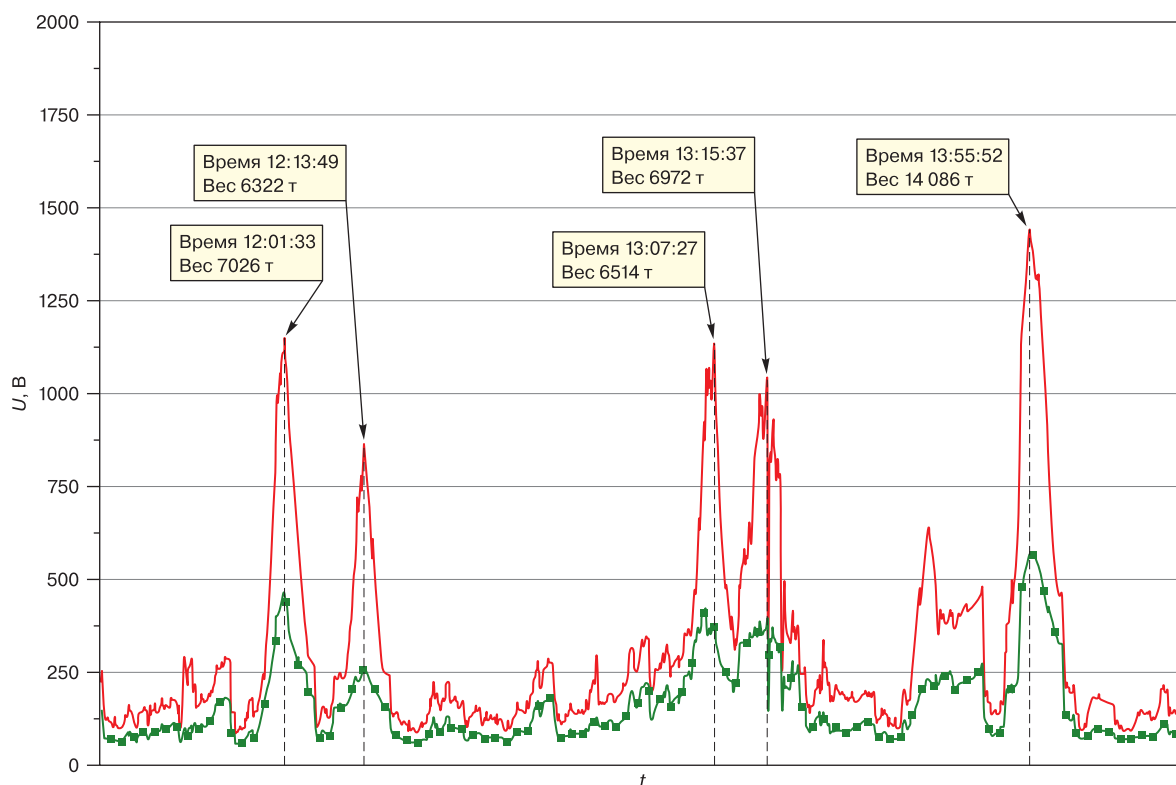


Рис. 13. Напряжение между рельсом и землей на сигнальной точке № 4 перегона Розенгартовка – Бойцово\*:  
—  $U_{\text{ампл}}$  — амплитудное (пиковое) значение напряжения; —  $U_{\text{действ}}$  — действующее значение напряжения  
\* Источник: данные авторов

Fig. 13. Voltage between rail and ground at signal point No. 4 of the Rosengartovka – Boitsovo proving ground\*:  
—  $U_{\text{ампл}}$  — amplitude (peak) voltage value; —  $U_{\text{действ}}$  — current voltage value  
\* Source: authors' data

<sup>5</sup> ГОСТ Р 55602–2013. Аппараты коммутационные для цепи заземления тяговой сети и тяговых подстанций железных дорог. Общие технические условия: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 сентября 2013 г. № 906-ст. М.: Стандартинформ, 2014. 21 с.



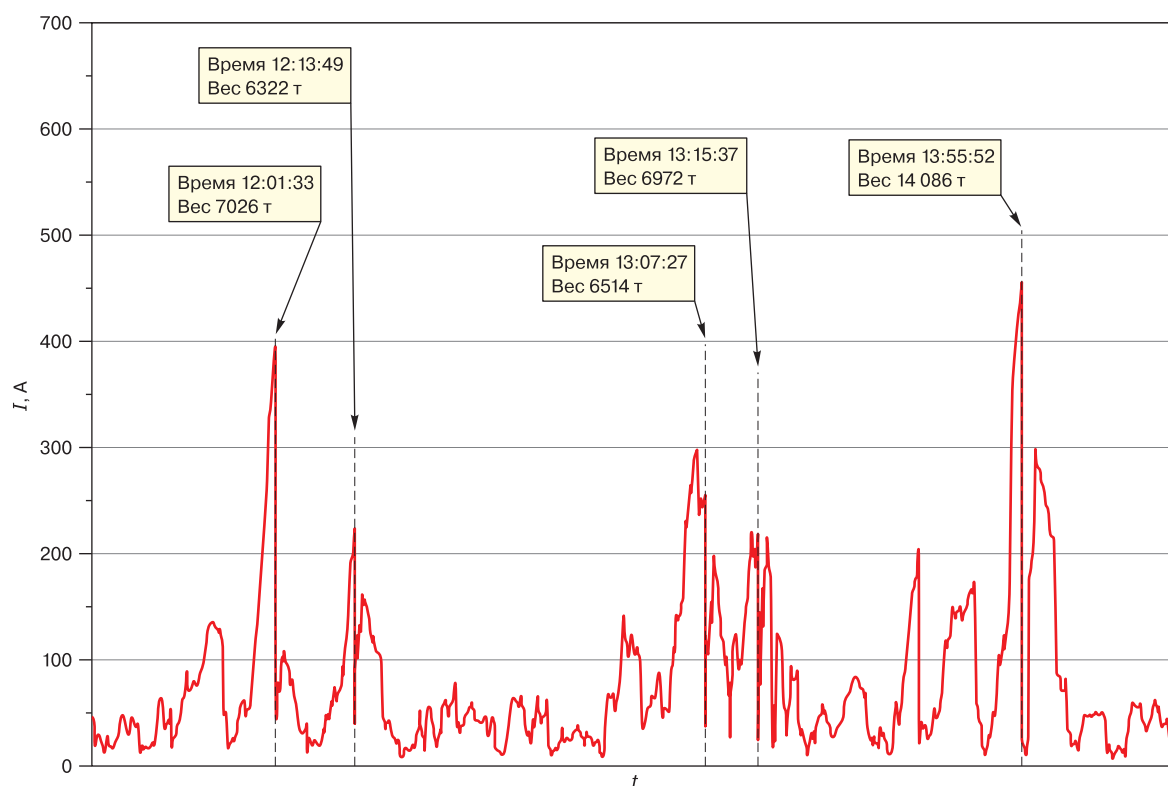


Рис. 14. Ток ДТ сигнальной точки № 4 перегона Розенгартовка – Бойцово\*

\* Источник: данные авторов

Fig. 14. Impedance transformer current of signal point No. 4 of the Rosengartovka – Boitsovo proving ground\*

\* Source: authors' data

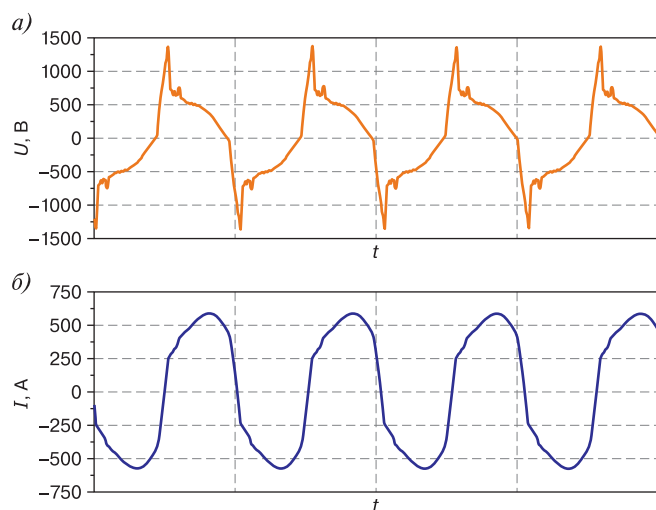


Рис. 15. График напряжения «рельс – земля» (а) и ток рельсовой линии (б) при проходе поезда весом 14 086 т\*

\* Источник: данные авторов

Fig. 15. Graph of the rail-to-earth voltage (a) and rail line current (b) during the passage of the train with 14 086 t weight\*

\* Source: authors' data

В результате произведенных измерений (рис. 16) максимальный потенциал между рельсом и землей при проходе поезда № 9218 весом 14 086 т в точках контроля достиг 1441 В, но не превысил 1500 В (действующее значение согласно ГОСТ Р 55602–2013<sup>6</sup>).

При использовании метода линейной экстраполяции с учетом средней скорости движения поезда № 9218 по рассматриваемому участку и максимального тягового тока значение максимального потенциала между рельсом и землей в данных условиях достигло 1930 В.

Для определения возможности использования в аварийном режиме работы СТЭ в цепях заземления опор КС элементов со статическим напряжением пробоя более  $2200 \pm 100$  В было осуществлено моделирование пробоя изоляции КС в программе COMSOL Multiphysics, использующей в расчетах метод конечных элементов. Самым неблагоприятным случаем является возникновение КЗ вблизи отключенной тяговой подстанции, так как в этом случае напряжение на опоре с пробитой изоляцией будет наименьшим. Было принято, что сопротивление заземления опоры с пробитой изоляцией составляет 10 Ом.

<sup>6</sup> Там же.

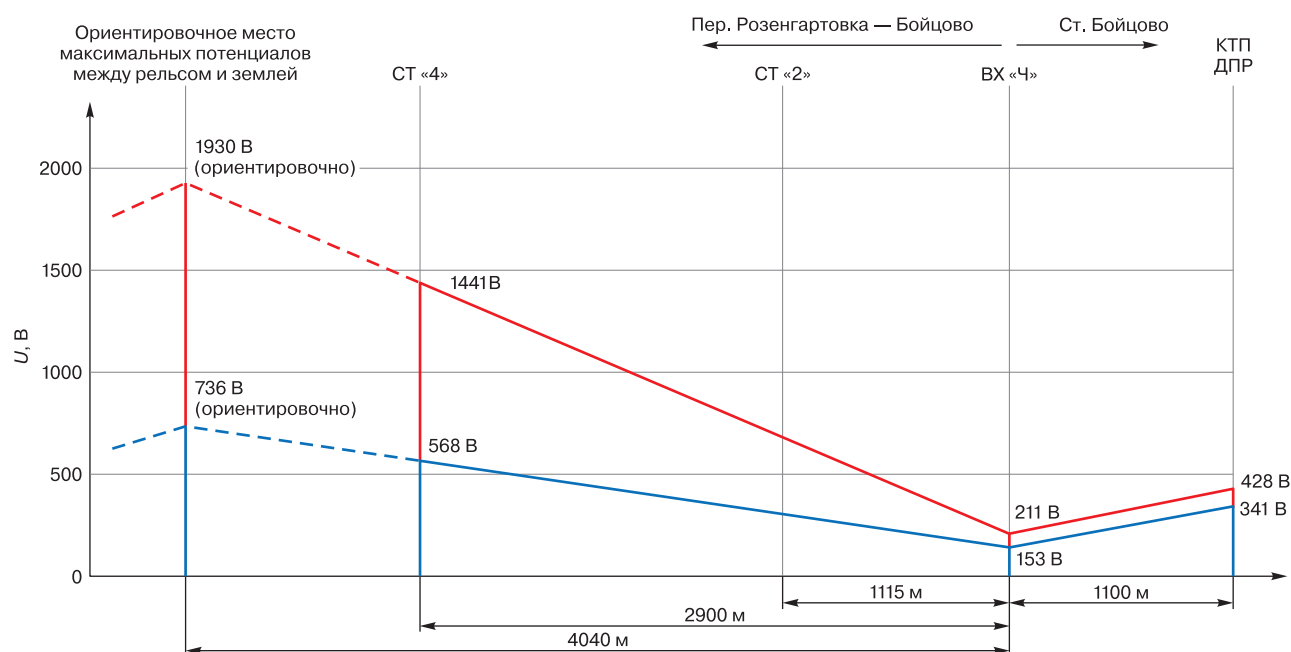


Рис. 16. Потенциальная диаграмма рассматриваемого участка при движении поезда весом 14 086 т\*:

—  $U_{ампл}$  — амплитудное (пиковое) значение напряжения; —  $U_{действ}$  — действующее значение напряжения  
\* Источник: данные авторов

Fig. 16. Potential diagram of the considered section with train weight 14 086 t in motion\*:

—  $U_{ампл}$  — amplitude (peak) voltage value; —  $U_{действ}$  — current voltage value  
\* Source: authors' data

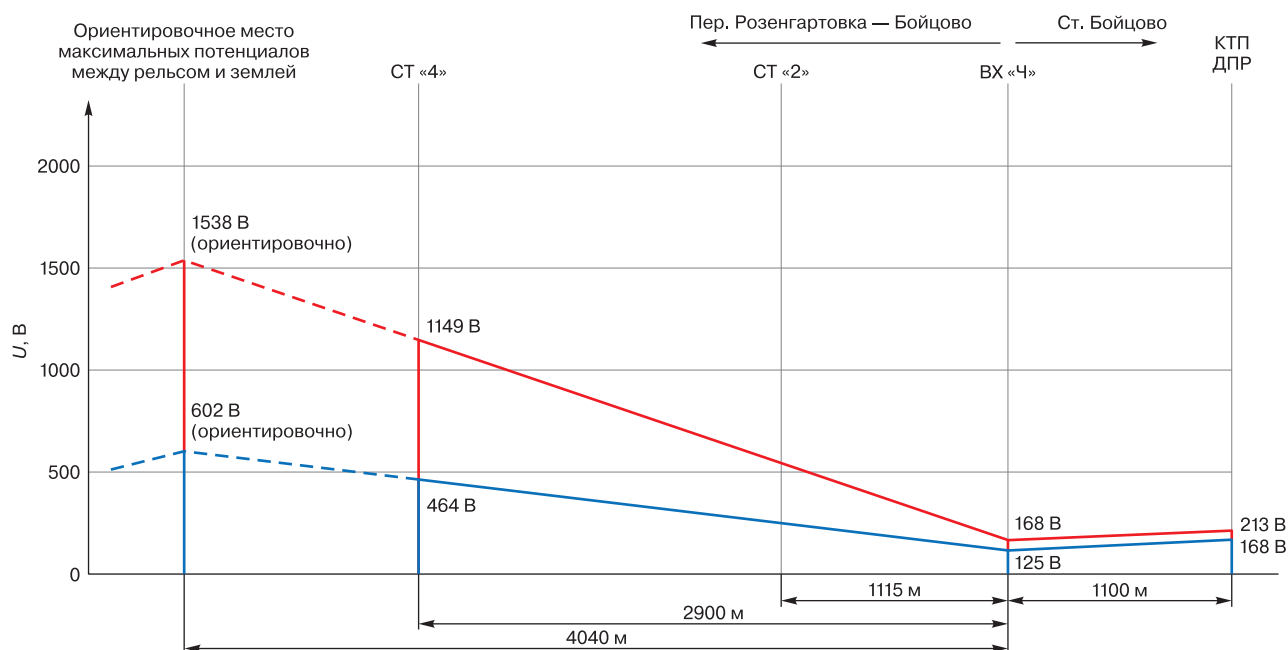


Рис. 17. Потенциальная диаграмма рассматриваемого участка при движении поезда весом 7026 т\*:

—  $U_{ампл}$  — амплитудное (пиковое) значение напряжения; —  $U_{действ}$  — действующее значение напряжения  
\* Источник: данные авторов

Fig. 17. Potential diagram of the considered section with train weight 7026 t in motion\*:

—  $U_{ампл}$  — amplitude (peak) voltage value; —  $U_{действ}$  — current voltage value  
\* Source: authors' data

По результатам моделирования установлено, что разность потенциалов между контактной подвеской и рельсами на опоре в месте КЗ значительно выше статического напряжения пробоя  $2200 \pm 100$  В. Следовательно, с точки зрения надежности срабатывания защиты при пробое изоляции КС на участках переменного тока возможно увеличение пробивного напряжения в диапазоне до  $(2300 - 2500 \text{ В}) \pm 100$  В. При этом электробезопасность эксплуатационного персонала с целью его защиты при нахождении в зоне работы коммутающих устройств в цепях заземления опор контактной сети и исключения вероятности поражения электрическим током за счет повышенного уровня статического напряжения пробоя должна обеспечиваться за счет выполнения требований ГОСТ Р 58321–2025, пункт 8.3.4.<sup>7</sup>

**Обсуждение и заключение.** По результатам проведенных экспериментальных исследований и измерений на участке Розенгартовка – Бойцово – Бикин Дальневосточной железной дороги была доказана возможность повышения пробивного напряжения коммутающих устройств до 2500 В для оценки возможности их применения в цепях заземления опор КС в работе обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ. Разработаны и классифицированы технические мероприятия по минимизации воздействия режимов обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ на работоспособность устройств ЖАТ с указанием степени их воздействия и с оценкой достигаемого эффекта, направленные на повышение эффективности и надежности работы устройств ЖАТ при взаимодействии с обратной тяговой сетью в системе тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ, которые, в свою очередь, способствуют снижению или исключению рисков возникновения критических ситуаций. Дополнительно на основании проведенного исследования была разработана автоматизированная обучающая система<sup>8</sup>, которая помогает в проведении расчетов, связанных с выбором параметров, определением характеристик, режимов и нагрузочной способности СТЭ и их отдельных элементов.

Важно отметить, что на эффективность совместной работы обратной тяговой сети и устройств ЖАТ влияют гармонический состав тягового тока, наличие продольной и поперечной асимметрии рельсовой линии, а также схемы заземления шкафов СЦБ. Также для более объективного и рационального выбора устройств обратной тяговой сети электрифицированных

железных дорог переменного тока напряжением 25 кВ совместно с устройствами ЖАТ на этапе проектирования, при выборе параметров и проектных решений целесообразно разработать методику совместного моделирования работы СТЭ и ЖАТ для повышения точности и возможностей проводимых расчетов с описанием алгоритма для целей последующей автоматизации на персональном компьютере.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

**Acknowledgments:** the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Funding:** the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с. EDN: <https://elibrary.ru/vmeqgbz>.
2. Косарев А. Б., Косарев Б. И. *Fundamentals of electromagnetic safety of railway power supply systems*. Moscow: Intext. 2008. 480 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vmeqgbz>.
3. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Электромагнитная совместимость электроустановок нетяговых потребителей и системы электроснабжения с высоковольтным питающим проводом // *Электричество*. 2020. № 1. С. 12–19. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-12-19>. EDN: <https://elibrary.ru/kpmxya>.
4. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Electromagnetic compatibility of the electrical installations of non-traction loads and the power supply system with a high-voltage power lead. *Elektrichestvo*. 2020; (1):12–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-12-19>. EDN: <https://elibrary.ru/kpmxya>.
5. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Electromagnetic effect of an alternating current traction power supply system with a high-voltage power cord on electrical installations and networks of nontraction consumers. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(2):128–134. <https://www.doi.org/10.3103/S1068371220020054>. EDN: <https://elibrary.ru/putbbz>.
6. Карякин Р. Н. Методика расчета сопротивлений тяговых сетей переменного тока. М.: Трансжелдориздат, 1962. 37 с.
7. Карякин Р. Н. *Methodology for calculating the resistances of AC traction networks*. Moscow: Transzheldorizdat. 1962. 37 p. (In Russ.).

<sup>7</sup> ГОСТ Р 58321–2025. Электроустановки систем тягового железнодорожного электроснабжения переменного тока. Требования к заземлению: принят 29 сентября 2025 г. № 1119-ст. 58 с.

<sup>8</sup> Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660736 Российская Федерация. Автоматизированная обучающая система «ЭЛБТОН». Модуль расчета обратной тяговой рельсовой сети: № 2024619015: заявл. 22.04.2024; опубл. 13.05.2024 / П. И. Смолин, А. Ю. Смыслов, Е. Д. Харьковская [и др.]; заявитель АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». EDN: <https://elibrary.ru/alyxqm>.

5. Бушуев А. В., Бушуев В. И., Бушуев С. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация. Екатеринбург: УрГУПС, 2014. 311 с. EDN: <https://elibrary.ru/vwpcjrp>.

Bushuev A. V., Bushuev V. I., Bushuev S. V. *Rail networks: theoretical foundations and operation*. Ekaterinburg: USURT, 2014. 311 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vwpcjrp>.

6. Рудашевский Р. А., Рудашевская А. В., Смолин П. И., Ребров И. А., Крылов А. А. Совершенствование автоматизированных средств определения режимов работы и расчета параметров системы тягового электроснабжения // Наука и образование транспорта. 2021. № 2. С. 66–69. EDN: <https://elibrary.ru/twncgm>.

Rudashevsky R. A., Rudashevskaya A. V., Smolin P. I., Rebrov I. A. Improvement of automated means for determining operating modes and calculating parameters of traction power supply system. *Science and Education for Transport*. 2021;(2):66–69. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/twncgm>.

7. Косарев Б. И. Электробезопасность в тяговых сетях переменного тока. М.: Транспорт, 1988. 215 с.

Kosarev B. I. *Electrical safety in AC traction networks*. Moscow: Transport, 1988. 215 p. (In Russ.).

8. Крылов А. А., Ребров И. А., Рудашевская А. В., Рудашевский Р. А., Харьковская Е. Д. Влияние переходного сопротивления балласта верхнего строения пути на величину потенциала рельс — земля на участках железных дорог, электрифицированных на переменном токе // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 16–22. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-16-22>. EDN: <https://elibrary.ru/swlkkq>.

Krylov A. A., Rebrov I. A., Rudashevskaya A. V., Rudashevskiy R. A., Khar'kovskaya E. D. Transition resistance influence of the upper structure track ballast on the rail-to-earth potential at AC railway sections. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):16–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-16-22>. EDN: <https://elibrary.ru/swlkkq>.

9. Тряпкин Е. Ю., Игнатенко И. В., Власенко С. А., Шурова Н. К. Исследование причин возникновения повышенных потенциалов тяговой рельсовой сети переменного тока путем регистрации данных в режиме единого времени // Транспорт Урала. 2023. № 1(76). С. 120–125. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-1-120-125>. EDN: <https://elibrary.ru/oplnph>.

Tryapkin E. Yu., Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Shurova N. K. Study of causes of increased potentials of alternating current traction rail network by registration of data in united time mode. *Transport of the Urals*. 2023;1(76):120–125. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-1-120-125>. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/oplnph>.

10. Ковалев В. А., Тряпкин Е. Ю., Игнатенко И. В. Расчет потенциала «рельс–земля» системы тягового электроснабжения 25 кВ в среде PascalABC.net // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 2(19). С. 44–46. EDN: <https://elibrary.ru/yaoiay>.

Kovalev V. A., Tryapkin E. Yu., Ignatenko I. V. Rail-to-earth potential calculation for 25 kV traction energy system in PascalABC.NET program. *Transport of the Asia-Pacific Region Science Journal*. 2019;2(19):44–46. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/yaoiay>.

11. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю., Ковалев В. А. Разработка методики расчета потенциала рельс — земля в условиях тяжеловесного движения // Научные труды КубГТУ. 2022. № 4. С. 93–102. EDN: <https://elibrary.ru/ugrcdr>.

Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Tryapkin E. Yu., Kovalev V. A. Development of a methodology for calculating the rail-to-ground potential in conditions of heavy traffic. *Scientific Papers of the Kuban State Technological University*. 2022;(4):93–102. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ugrcdr>.

12. Тряпкин Е. Ю., Шурова Н. К. Исследование влияния режима работы электроподвижного состава на потенциал в рельсовой цепи // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2020. № 4(25). С. 74–78. EDN: <https://elibrary.ru/uhiihj>.

Tryapkin E. Yu., Shurova N. K. Examining the influence of electric rolling stock operating mode on the potential in the rail chain. *Transport of the Asia-Pacific Region Science Journal*. 2020;4(25):74–78. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/uhiihj>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Антон Александрович КРЫЛОВ,

директор центра «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 9113-4100, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

### Александр Борисович КОСАРЕВ,

д-р техн. наук, проф., научный руководитель института — ученый секретарь, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Anton A. KRYLOV,

Director of Electrification and Thermal Power Engineering Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 9113-4100, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

### Alexander B. KOSAREV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific Adviser — Scientific Secretary, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Антон Александрович КРЫЛОВ.** Обзор основных направлений исследования, обоснование направления исследования, формулировка цели и задач, сбор и структурирование методики проведения испытаний, расчет зависимостей и обработка результатов, написание статьи (90 %).

**Александр Борисович КОСАРЕВ.** Формирование выводов и предложений (10 %).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Anton A. KRYLOV.** Overview of the main research directions and their justification, goals and objectives formulation, collection and structuring of test methods, calculation of dependencies and processing of results, article writing (90 %).

**Alexander B. KOSAREV.** Conclusions and suggestions formulation (10 %).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию 15.10.2025, рецензия от первого рецензента получена 31.10.2025, рецензия от второго рецензента получена 05.11.2025, рецензия от третьего рецензента получена 11.11.2025, принята к публикации 26.11.2025.

The article was submitted 15.10.2025, first review received 31.10.2025, second review received 05.11.2025, third review received 11.11.2025, accepted for publication 26.11.2025.

Оригинальная научная статья

УДК 629.423.31: 625.032.37

EDN: <https://elibrary.ru/urebda>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-287-300>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



## Процессы срыва и восстановления сцепления колес с рельсами электровоза переменного тока с управляемыми преобразователями возбуждения коллекторных тяговых двигателей

А. Н. Савоськин, А. А. Чучин✉

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),  
Москва, Российская Федерация

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** На электровозах постоянного и переменного тока широко применяются коллекторные тяговые двигатели последовательного возбуждения, недостатком которых является их повышенная склонность к буксованию. Необходимо найти современное решение актуальной задачи повышения сцепных свойств электровозов. Для этого должны быть рассмотрены процессы срыва и восстановления сцепления колесных пар электровоза переменного тока с управляемыми преобразователями возбуждения коллекторных тяговых электродвигателей, обеспечивающими плавные переходы с характеристик последовательного на независимое возбуждение, а также возможность плавного управления токами возбуждения и силами тяги в этих режимах. Целью статьи является разработка предложений по повышению сцепных свойств электровозов.

**Материалы и методы.** Авторами предложена методика исследований срыва сцепления колесной пары электровоза. Рассмотрены процессы взаимодействия колесных пар и рельсов при наезде на масляное пятно, определены значения сил тяги, сил сцепления, а также скорости проскальзывания колесных пар. Исследование указанных процессов выполнялось на математической модели, разработанной в программном пакете Matlab/Simulink.

**Результаты.** Результаты исследования процессов при срыве сцепления под одним колесом колесной пары, а также при срыве сцепления под обоими колесами колесной пары показали, что сила сцепления первой колесной пары становится значительно меньше силы тяги двигателя, чем в случае срыва сцепления под одним колесом. Это вызывает значительное увеличение относительной скорости скольжения колеса от 6,9 % при срыве сцепления под одним колесом и до 9,5 % при срыве сцепления под обоими колесами, при этом возрастает и скорость вращения колеса.

**Обсуждение и заключение.** Полученные результаты целесообразно использовать в дальнейшем при разработке систем управления силой тяги на пределе по сцеплению и систем управления проскальзыванием колесных пар грузовых электровозов переменного тока с транзисторным управляемым мостом коллекторных тяговых двигателей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электровоз, коллекторный тяговый двигатель, коэффициент сцепления, проскальзывание, управляемый преобразователь возбуждения, система «колесо – рельс», сила тяги, сила сцепления, скорость скольжения

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Савоськин А. Н., Чучин А. А. Процессы срыва и восстановления сцепления колес с рельсами электровоза переменного тока с управляемыми преобразователями возбуждения коллекторных тяговых двигателей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 287–300. EDN: <https://elibrary.ru/urebda>.



Original article

UDK 629.423.31: 625.032.37

EDN: <https://elibrary.ru/urebda>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-287-300>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



## Clutch failure and recovery processes of rail wheels of AC electric locomotive with controlled excitation converters of the collector traction motors

Anatoliy N. Savos'kin, Anton A. Chuchin✉

Russian University of Transport,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Collector traction motors of sequential excitation are widely used on DC and AC electric locomotives, which disadvantage is their increased tendency to slip. It is necessary to find a modern solution to the urgent task of improving coupling properties of electric locomotives. In this regard, the processes of disrupting and restoring the coupling of wheel pairs of an alternating current electric locomotive with controlled excitation converters of collector traction motors should be considered, providing smooth transitions to sequential and independent excitation characteristics, as well as the possibility of smooth control of excitation currents and traction forces in these modes. The objective of the paper is to develop proposals to improve the coupling properties of electric locomotives.

**Materials and methods.** The authors propose a methodology for studying the clutch failure of an electric locomotive wheel pair. The processes of interaction of wheel pairs and rails when hitting an oil stain are considered, and the values of traction forces, adhesion forces, and the speed of wheel pair slippage are determined. The study of these processes was carried out using a mathematical model developed in the Matlab/Simulink software package.

**Results.** The results of processes study in case of clutch failure under one wheel of a wheel pair, as well as in case of clutch failure under both wheels of a wheel pair, showed that the clutch force of the first wheel pair becomes significantly lower than the thrust force of the engine rather than in case of clutch failure under one wheel. This causes a considerable increase in the relative sliding speed of the wheel from 6.9 % when the clutch is broken under one wheel to 9.5 % when the clutch is broken under both wheels. At the same time, the speed of the wheel rotation increases.

**Discussion and conclusion.** The results obtained in this article may be used for the development of traction force control systems at the adhesion limit and wheel pair slip control systems for AC freight electric locomotives with controlled excitation converters for commutator traction motors.

**KEYWORDS:** electric locomotive, commutator traction motor, adhesion coefficient, slipping, controlled excitation converter, wheel – rail system, traction force, adhesion force, sliding speed

**FOR CITATION:** Savos'kin A. N., Chuchin A. A. Clutch failure and recovery processes of rail wheels of AC electric locomotive with controlled excitation converters of the collector traction motors. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):287–300. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-287-300>.

**Введение.** На электроподвижном составе постоянного и переменного тока массово применяются коллекторные тяговые двигатели последовательного возбуждения. Главным недостатком такого типа двигателей является их повышенная склонность к разносному буксованию, что ставит эксплуатантов перед необходимостью значительно снижать силу тяги и ограничивать массу поезда.

Известны следующие способы повышения сцепления колес с рельсами:

- механические (подача кварцевого песка в зону контакта колеса и рельса, использование активизаторов сцепления, применение догружающих устройств) [1, 2];
- химические (обработка рабочей поверхности рельсов специальными составами — модификаторами трения; модификация поверхности колес с использованием растворов силикатов) [3];
- электромагнитные (воздействие на контакт колеса с рельсом регулируемым электрическим током или регулируемым магнитным потоком) [4];
- электрические системы (применение различных схемотехнических решений, позволяющих изменять жесткость характеристик буксующих двигателей).

В работе Г. В. Самме [5] для электропоездов постоянного тока ВЛ10 с коллекторными тяговыми электродвигателями (далее — ТЭД) предложена автоматическая система повышения сцепления буксующих ТЭД за счет шунтирования обмоток якорей активными сопротивлениями, применение которых вызывает дополнительные потери энергии.

В работе [6] для улучшения противобуксовочных свойств электропоездов переменного тока 2ЭС5К с ТЭД последовательного возбуждения и сохранения при этом его мягких статических характеристик предложена схема с конденсаторным накопителем энергии в цепи возбуждения ТЭД. При срыве сцепления колесной пары накопитель энергии начинает разряжаться через обмотку возбуждения, препятствуя снижению тока возбуждения, тем самым повышая жесткость тяговой характеристики и кратковременно снижая силу тяги буксующего ТЭД.

Однако в рассмотренных схемотехнических решениях [5, 6] реализуется ступенчатое изменение силы тяги буксующего ТЭД и отсутствует возможность непосредственного плавного управления силой тяги электропоезда при нарушении условий сцепления. Это обстоятельство не позволяет в полной мере управлять сцеплением и является существенным недостатком таких систем.

В работе Ю. И. Клименко<sup>1</sup> для повышения тяговых свойств тепловозов и обеспечения эффективности систем защиты от буксования предлагается использовать

автоматическое управление жесткостью тяговой характеристики коллекторного электродвигателя последовательного возбуждения. Особенности построения структуры силовой цепи, системы и алгоритмов управления для автономного тягового подвижного состава (тепловозов) не позволяют применить предложенную систему на электропоездах с аналогичным типом тягового двигателя.

Как показывает анализ исследований, большинство из распространенных методов повышения сцепления колес железнодорожного подвижного состава с рельсами обладает существенными недостатками, поэтому цель данной работы — предложить современное решение актуальной задачи повышения сцепных свойств электропоездов.

Известно, что применение системы независимого возбуждения коллекторных ТЭД существенно улучшает тяговые и энергетические показатели электропоездов переменного тока. Такая система реализована на электропоездах 3ЭС5К [7]. Однако на этих электропоездах при переходах с последовательного возбуждения на независимое (или с независимого возбуждения на последовательное) на каждой секции происходит поочередное отключение ТЭД от источников питания — выпрямительно-инверторных установок (далее — ВИУ). Затем обмотки возбуждения отключаются от якорей, включаются последовательно и подключаются к отдельному источнику питания — управляемому выпрямителю возбуждения. Эти переключения приводят к потере, а затем к восстановлению силы тяги секции и значительному изменению силы тяги всего электропоезда, что вызывает появление нежелательных продольных рывков и толчков в поезде [8]. Достаточно продолжительный процесс таких переключений поочередно для трех секций электропоезда приводит к значительному снижению скорости движения поезда, что особенно опасно при следовании по затяжным подъемам.

Для исключения таких явлений предложено выполнить шунтирование обмотки возбуждения транзисторным управляемым мостом (далее — УПВ) на транзисторах VT1–VT4 [9], получающих питание от диодного выпрямителя (рис. 1). На рисунке показано, что тяговый двигатель получает питание от ВИУ, как и на обычных серийных электропоездах. Якорь двигателя и обмотка возбуждения включены последовательно, и по ним проходит одинаковый ток, который будем называть ток двигателя  $i_d$ .

В этом случае при включении вентилей VT1 и VT4 происходит увеличение тока возбуждения. Это явление будем называть подпиткой обмотки возбуждения током  $i_{\pi}$ .

<sup>1</sup> Клименко Ю. И. Исследование электропривода с изменяемой жесткостью тяговой характеристики: дисс. канд. техн. наук: 05.22.07. Коломна, 2004. 88 с.

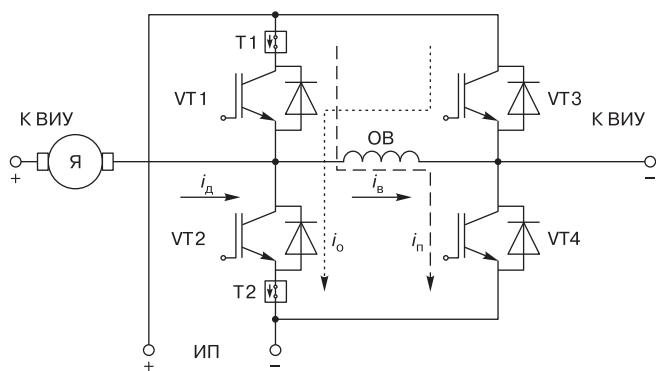


Рис. 1. Схема мостового транзисторного управляемого преобразователя для питания обмоток возбуждения тягового двигателя с датчиками тока\*:

T1, T2 — датчики тока; ОВ — обмотка возбуждения ТЭД; Я — якорь ТЭД; ИП — источник питания; — — — направление протекания тока подпитки; ..... — направление протекания тока отпитки

\* Источник: данные авторов

Fig. 1. Diagram of a bridge transistor controlled converter for powering the excitation windings of a traction motor with current sensors\*:

T1, T2 — current sensors; ОВ — AC traction motor excitation winding; Я — AC traction motor armature; ИП — power supply; — — — seed current flow direction; ..... — excitation current reduction flow direction

\* Source: authors' data

Если же включить вентили VT2 и VT3, происходит уменьшение тока возбуждения, которое будем называть отпиткой обмотки возбуждения током  $i_o$ . Используя токи подпитки и отпитки, можно обеспечить режимы работы тягового двигателя с независимым возбуждением, изменяя ток  $i_n$  так, чтобы сумма этого тока и тока двигателя  $i_d$  была постоянной и равной току независимого возбуждения  $i_b$ :

$$i_b = i_d + i_n. \quad (1)$$

При реализации режима отпитки можно обеспечивать работу тягового двигателя в режиме последовательного уменьшенного возбуждения (ослабления поля):

$$i_b = i_d - i_o. \quad (2)$$

И, наконец, если не включать вентили УПВ, то тяговый двигатель будет работать в обычном режиме последовательного возбуждения.

Отметим также, что измерение тока подпитки выполняется датчиком тока T1, включенным перед вентилем VT1, а измерение тока отпитки — датчиком тока T2, включенным после вентилей VT2.

Таким образом, применение УПВ позволяет реализовать режимы независимого, а также последовательного возбуждения тягового двигателя с нормальным

и уменьшенным возбуждением. Отличительная особенность предлагаемой схемы обусловлена тем, что переходы из режимов последовательного возбуждения в независимое и наоборот происходят без разрыва силовой цепи и, следовательно, без потери силы тяги.

**Методика исследований срыва сцепления колесной пары электровоза.** Рассмотрим возможности применения УПВ для стабилизации условий сцепления колесных пар (далее — КП) электровоза с рельсами. Для этого при работе электровоза в режиме независимого возбуждения будем моделировать процесс наезда на масляное пятно, снижая в два раза силу сцепления колеса с рельсом  $F_{сц}$ , Н. При этом силу сцепления будем определять по выражению<sup>2</sup>:

$$F_{сц} = \psi P, \quad (3)$$

где  $P$  — вертикальная нагрузка, передаваемая от колеса на рельс, кН;

$\psi$  — коэффициент сцепления колеса с рельсом, определяемый по дислокационной модели сцепления<sup>3</sup>:

$$\psi = 3,513 \cdot 10^2 \mu_y \Lambda_p \left( \frac{F_k(v_\Sigma)}{S_0 \sigma_{вн}} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

где  $\left( \frac{F_k(v_\Sigma)}{S_0 \sigma_{вн}} \right)^{0,25}$  — коэффициент, учитывающий инерционность движения дислокаций ( $\sigma_{вн}$  — внутренние напряжения в материале, обусловленные наклепом,  $\sigma_{вн} \approx 107$  Па;  $S_0$  — площадь пятна контакта,  $S_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>);

$\mu_y$  — коэффициент, учитывающий увеличение числа дислокаций в зависимости от скорости пластической деформации. Данный показатель рассчитывается по формуле:

$$\mu_y = \frac{7 \cdot 10^{-2} v_\Sigma + 0,022 v_\Sigma^2 - 0,48 \cdot 10^{-4} v_\Sigma^3}{2,5 + v_\Sigma}, \quad (5)$$

где  $v_\Sigma = v_d + v_{ск}$  — скорость перемещения точки контакта, равная сумме линейной скорости движения локомотива  $v_d$ , км/ч, и скорости скольжения колеса относительно рельса  $v_{ск}$ , км/ч.

$\Lambda_p$  — коэффициент разрушения пленки масла на рельсах, вычисляемый по формуле:

$$\Lambda_p = (\epsilon)^{0,3} \exp \left( \frac{23}{2,2 \cdot 10^5 \epsilon + 300} - 10\epsilon + \frac{0,45\epsilon}{5\epsilon^2 + 0,1\epsilon + 1} \right), \quad (6)$$

<sup>2</sup> Осипов С. И., Осипов С. С., Феоктистов В. П. Теория электрической тяги: учебн. для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2006. 436 с.

<sup>3</sup> Ляпушкин Н. Н. Прогнозирование сцепных свойств локомотивов различными типами тяговых электродвигателей: дисс. д-ра техн. наук: 05.22.07. М., 2014. 258 с.

где  $F_k(v_\Sigma)$  — касательная сила на площадке контакта колеса и рельса, определяемая тяговой характеристикой локомотива;

$\varepsilon$  — относительная скорость скольжения, %, по формуле

$$\varepsilon = \frac{v_{ск}}{v_\Sigma}. \quad (7)$$

Рассмотренная дислокационная модель взаимодействия колеса и рельса показала удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, опубликованными О. Polach [11–13].

Сила тяги двигателя  $F_{кл}$ , Н, определяется выражением [9]:

$$F_{кл} = c_F I_d \Phi(I_B), \quad (8)$$

где  $c_F$  — конструкционная постоянная ТЭД;

$I_d$ ,  $\Phi(I_B)$  и  $I_B$  — соответственно, ток ТЭД, А, магнитный поток, зависящий от тока возбуждения, Вб, и ток возбуждения, А, определяемые при расчете электромагнитных процессов в ТЭД.

Конструкционная постоянная ТЭД определяется формулой:

$$c_F = \frac{\mu p N}{\pi D_6 a}, \quad (9)$$

где  $N$  — число проводников обмотки якоря;

$a$  — число пар параллельных ветвей;

$p$  — число пар полюсов;

$\mu$  — передаточное отношение;

$D_6$  — диаметр бандажа по кругу катания, м.

Для исследования электромагнитных и электромеханических процессов в электровозе переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями, оборудованном управляемыми преобразователями возбуждения, используем математическую модель, приведенную в [8]. Для определения скоростей скольжения колес колесной пары относительно рельса дополним рассмотренную модель уравнениями крутильных колебаний в тяговой передаче электровоза, приведенными в работе [11]. Исследование указанных процессов выполнялось на математической модели, разработанной в программном пакете Matlab/Simulink.

При моделировании электромагнитных и электромеханических процессов зададимся 30-минутной тяговой характеристикой постоянства силы тяги электровоза, при которой в течение 30 мин реализуется максимальная мощность. Также будем учитывать, что при реализации силы тяги происходит перераспределение вертикальной нагрузки на колесные пары электровоза. Примем, что первая колесная пара в каждой секции электровоза разгружается на 10 %, вторая — на 5 %. При этом, третья колесная пара догружается на 5 %, четвертая — на 10 %. Такое перераспределение

вертикальных нагрузок приводит к ухудшению условий сцепления первых по ходу движения колесных пар. В связи с этим возникает необходимость поосного управления силой тяги, при котором наибольшую силу тяги реализует последняя колесная пара каждой секции электровоза, а наименьшую — первая колесная пара. Зададимся следующими значениями сил тяги двигателей в соответствии с принятыми величинами разгрузок и догрузок колесных пар:

$$\begin{aligned} F_{кл31} &= 0,90 F_{кл3}, & F_{кл32} &= 0,95 F_{кл3}, \\ F_{кл33} &= 1,05 F_{кл3}, & F_{кл34} &= 1,1 F_{кл3}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $F_{кл3}$  — заданное значение силы тяги одного тягового двигателя или одной колесной пары, кН.

В сумме значения сил тяги отдельных двигателей  $F_{кл31}$ ,  $F_{кл32}$ ,  $F_{кл33}$ ,  $F_{кл34}$ , кН, дадут исходное заданное значение силы тяги одной секции электровоза  $F_{к3}$ , кН:

$$F_{к3} = \sum_{i=1}^4 F_{кл3i}, \quad (11)$$

где  $i$  — номер тягового двигателя;

$F_{кл3i}$  — заданная сила тяги  $i$ -го двигателя, кН.

Срыв сцепления будем моделировать путем снижения коэффициента сцепления первой колесной пары в два раза в момент времени 12 с. Рассмотрим два варианта нарушения условий сцепления:

- вариант 1 — срыв сцепления под левым колесом первой колесной пары;
- вариант 2 — срыв сцепления под обоими колесами первой колесной пары.

Зададимся алгоритмом работы УПВ, при котором в момент нарушения условий сцепления ток возбуждения двигателя остается на прежнем уровне, т. е. происходит стабилизация тока возбуждения при снижении тока двигателя из-за роста скорости  $v_\Sigma$  и, следовательно, увеличение электродвижущей силы (далее — ЭДС):

$$e = c_e v_\Sigma \Phi(I_B), \quad (12)$$

где  $c_e = \frac{\mu p N}{3,6 \pi D_6 a} = 206,3 \text{ м}^{-1}$  — конструкционная постоянная ТЭД, связывающая ЭДС и скорость движения.

Для обоих вариантов моделирования, с учетом поосного управления силой тяги, установившиеся значения перед срывом сцепления составляют:

- относительной скорости скольжения первой колесной пары  $\varepsilon_1 = 1,9 \%$ ;
- токов двигателей, соответственно, для различных ТЭД:  $I_{д1} = 895 \text{ А}$ ,  $I_{д2} = 925 \text{ А}$ ,  $I_{д3} = 1004 \text{ А}$ ,  $I_{д4} = 1040 \text{ А}$ ;
- токов возбуждения, соответственно:  $I_{в1} = 926 \text{ А}$ ,  $I_{в2} = 925 \text{ А}$ ,  $I_{в3} = 1043 \text{ А}$ ,  $I_{в4} = 1040 \text{ А}$ ;
- сил тяги двигателей, соответственно:  $F_{кл1} = 61,0 \text{ кН}$ ,  $F_{кл2} = 64,5 \text{ кН}$ ,  $F_{кл3} = 71,2 \text{ кН}$ ,  $F_{кл4} = 74,5 \text{ кН}$ .



**Результаты исследования.** Рассмотрим вначале переходные процессы, возникающие при срыве сцепления под левым колесом первой колесной пары. Уменьшение коэффициента сцепления в два раза приводит к снижению силы сцепления также в два раза (рис. 2) в момент времени 12 с. Сила сцепления первой колесной пары  $F_{сц1}$  становится меньше силы тяги двигателя  $F_{кл1}$ , что вызывает увеличение относительной скорости скольжения  $\varepsilon_{1л}$  с 1,9 % до 6,9 % (рис. 2, б) и, следовательно, скорости вращения колеса  $v_{\Sigma}$ .

При этом сила сцепления под правым колесом первой колесной пары вначале возрастает (рис. 2, в), а при превышении величины относительной скорости скольжения критического значения 3 % начинает снижаться. Как только сила тяги становится меньше силы сцепления (в момент времени 13 с), рост относительной скорости скольжения прекращается, и ее среднее значение составляет 5,5 %. При этом возникают высокочастотные колебания с частотами 61,5 Гц и 71,5 Гц, близкими к собственным частотам крутильных колебаний колес на угловых жесткостях оси колесной пары и вала ТЭД. Отметим, что при работе ТЭД в режиме последовательного возбуждения возникло бы разное буксование с уменьшением силы тяги до нуля и неограниченным ростом скорости вращения колеса.

Таким образом, при работе ТЭД в режиме независимого возбуждения разное буксование не возникает, как и при срыве сцепления на электровозах с асинхронными тяговыми электродвигателями.

На рис. 2, г приведен фазовый портрет автоколебаний для левого колеса первой колесной пары, т. е. зависимость силы сцепления от относительной скорости скольжения  $F_{сц1л}(\varepsilon_{1л})$ . Видно, что процесс срыва сцепления развивается по направлению, указанному стрелками. При значениях силы сцепления 31,6 кН и относительной скорости скольжения 0,019 (1,9 %) происходит снижение коэффициента сцепления в два раза, а, следовательно, и силы сцепления, которая снижается до значения 16,3 кН. Это вызывает увеличение  $\varepsilon_{1л}$  до значения 0,069 (6,9 %) и переход колесной пары в режим буксования, сопровождающийся высокочастотными колебаниями силы сцепления и относительной скорости скольжения. Фазовый портрет автоколебаний, т. е. зависимость  $F_{сц1л}(\varepsilon_{1л})$ , имеет замкнутый петлевой вид, что свидетельствует об устойчивости процесса автоколебаний.

Таким образом, срыв сцепления и буксование первой колесной пары при работе ТЭД на тяговой характеристике независимого возбуждения не вызывает перехода в разное буксование. Однако величина скорости скольжения 6,5 % является большой и при длительном буксовании может вызвать перегрев поверхности катания колесной пары. При этом происходит фазовый переход металла с выделением

на поверхности катания колес хрупкой мартенситной фазы, что приводит к вырывам металла с поверхности катания (электровозы 2ЭС10 [14]) или растрескиванию этой поверхности (электropоезда «Сапсан», электровозы с асинхронными ТЭД).

Отметим также, что на фазовом портрете  $F_{сц1л}(\varepsilon_{1л})$  (рис. 2, г), как и на графиках  $\varepsilon_{1л}(t)$  и  $F_{сц1л}(t)$  (рис. 2, б и в), видно присутствие высокочастотных автоколебаний с частотами 61,5–71,5 Гц, которые соответствуют угловым колебаниям колес на угловых жесткостях оси колесной пары и вала ТЭД.

При нарушении условий сцепления ЭДС первого двигателя  $e_1$  возрастает на 8 В (рис. 3, б) за счет увеличения скорости вращения колеса. Ток возбуждения двигателя  $I_{в1}$  (рис. 3, в) остается на прежнем уровне за счет работы УПВ в режиме подпитки. В соответствии с выражением (1), при снижении тока первого двигателя  $I_{д1}$  от 895 А до 600 А (рис. 3, г) возрастает ток подпитки, сохраняя ток возбуждения на прежнем уровне. Снижение тока двигателя при неизменном токе возбуждения вызывает уменьшение силы тяги  $F_{кл1}$  с 61 кН до 41,5 кН, или на 32 % (рис. 3, д). Срыв сцепления под одним колесом первой колесной пары не приводит к изменениям величин токов (рис. 3, в, д) и сил тяги (рис. 3, г) второго, третьего и четвертого двигателей, и они остаются на прежнем уровне. Таким образом, применение УПВ позволяет обеспечить индивидуальное управление двигателем, снижая силу тяги только буксующей оси. При этом остальные ТЭД реализуют заданные значения регулируемых величин.

Рассмотрим переходные процессы, возникающие при срыве сцепления одновременно под левым и правым колесами первой колесной пары.

При снижении коэффициента сцепления в два раза (рис. 4, а) в момент времени 12 с, сила сцепления первой колесной пары  $F_{сц1}$  становится значительно меньше силы тяги двигателя  $F_{кл1}$ , чем при срыве сцепления под одним колесом. Это вызывает более значительное увеличение относительной скорости скольжения колеса от  $\varepsilon_{1л} = 1,9\%$  до значения 9,5 % (рис. 4, б), при этом возрастает и скорость вращения колеса. Однако разное буксование и в этом случае не возникает.

Характер изменения сил сцепления под левым и правым колесами первой колесной пары становится одинаковым (рис. 4, в). Как только сила тяги становится меньше силы сцепления (в момент времени 13 с), рост относительной скорости скольжения прекращается, и ее среднее значение  $\varepsilon_{1л}$  составит 9 %. При этом возникают высокочастотные колебания с частотой 61,5 Гц.

На рис. 4, г приведен фазовый портрет автоколебаний для левого колеса первой колесной пары, из которого видно, что процесс срыва сцепления также развивается по направлению, указанному стрелками.



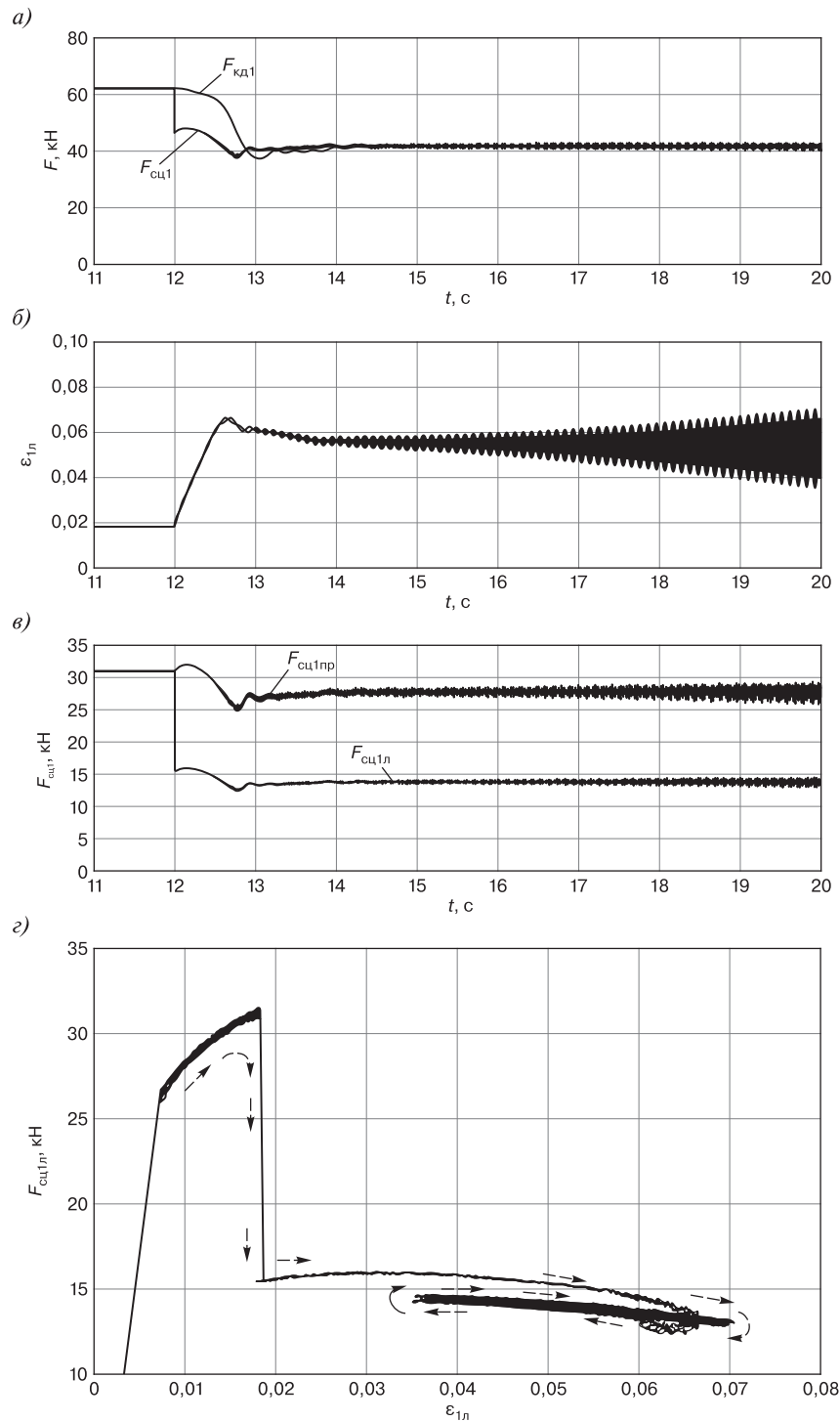


Рис. 2. Процессы при срыве сцепления под левым колесом первой колесной пары. Зависимости\*:

*a* — силы тяги первого двигателя  $F_{кд1}$  и силы сцепления первой колесной пары  $F_{сц1}$  от времени; *б* — относительной скорости скольжения левого колеса  $\varepsilon_{1л}$  от времени; *в* — силы сцепления левого  $F_{сц1л}$  и правого  $F_{сц1пр}$  колес от времени; *г* — силы сцепления левого колеса от относительной скорости скольжения

\* Источник: данные авторов

Fig. 2. Processes during the release of the clutch under the left wheel of the first wheel pair. Dependencies\*:

*a* — traction force of the first engine  $F_{кд1}$  and the clutch force of the first wheel pair  $F_{сц1}$  time dependency; *б* — relative sliding speed of the left wheel  $\varepsilon_{1л}$  time dependency; *в* — clutch forces of the left  $F_{сц1л}$  and right  $F_{сц1пр}$  wheels time dependency; *г* — clutch force of the left wheel relative sliding speed dependency

\* Source: authors' data

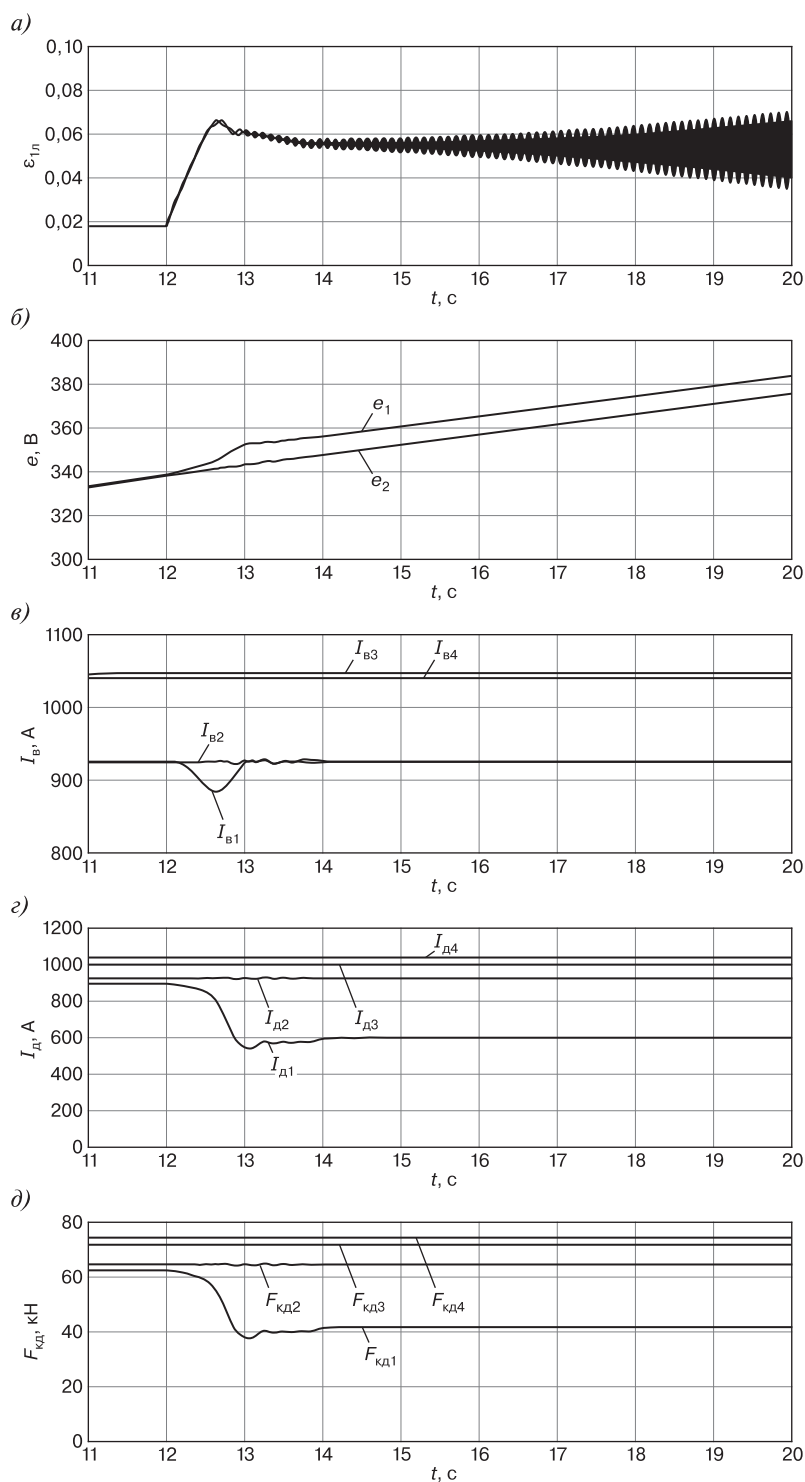


Рис. 3. Процессы при срыве сцепления под левым колесом первой колесной пары. Зависимости от времени\*:  
 а — относительной скорости скольжения; б — ЭДС первого  $e_1$  и второго  $e_2$  двигателей; в — токов возбуждения двигателей  $I_{в1}$ – $I_{в4}$ ;  
 г — токов двигателей  $I_{д1}$ – $I_{д4}$ ; д — сил тяги двигателей  $F_{кд1}$ – $F_{кд4}$   
 \* Источник: данные авторов

Fig. 3. Processes during the release of the clutch under the left wheel of the first pair. Time dependencies\*:  
 а — relative sliding speed; б — electromotive force of the first  $e_1$  and second  $e_2$  motors; в — excitation currents of the motors  $I_{в1}$ – $I_{в4}$ ;  
 г — currents of the motors  $I_{д1}$ – $I_{д4}$ ; д — traction forces of the motors  $F_{кд1}$ – $F_{кд4}$   
 \* Source: authors' data

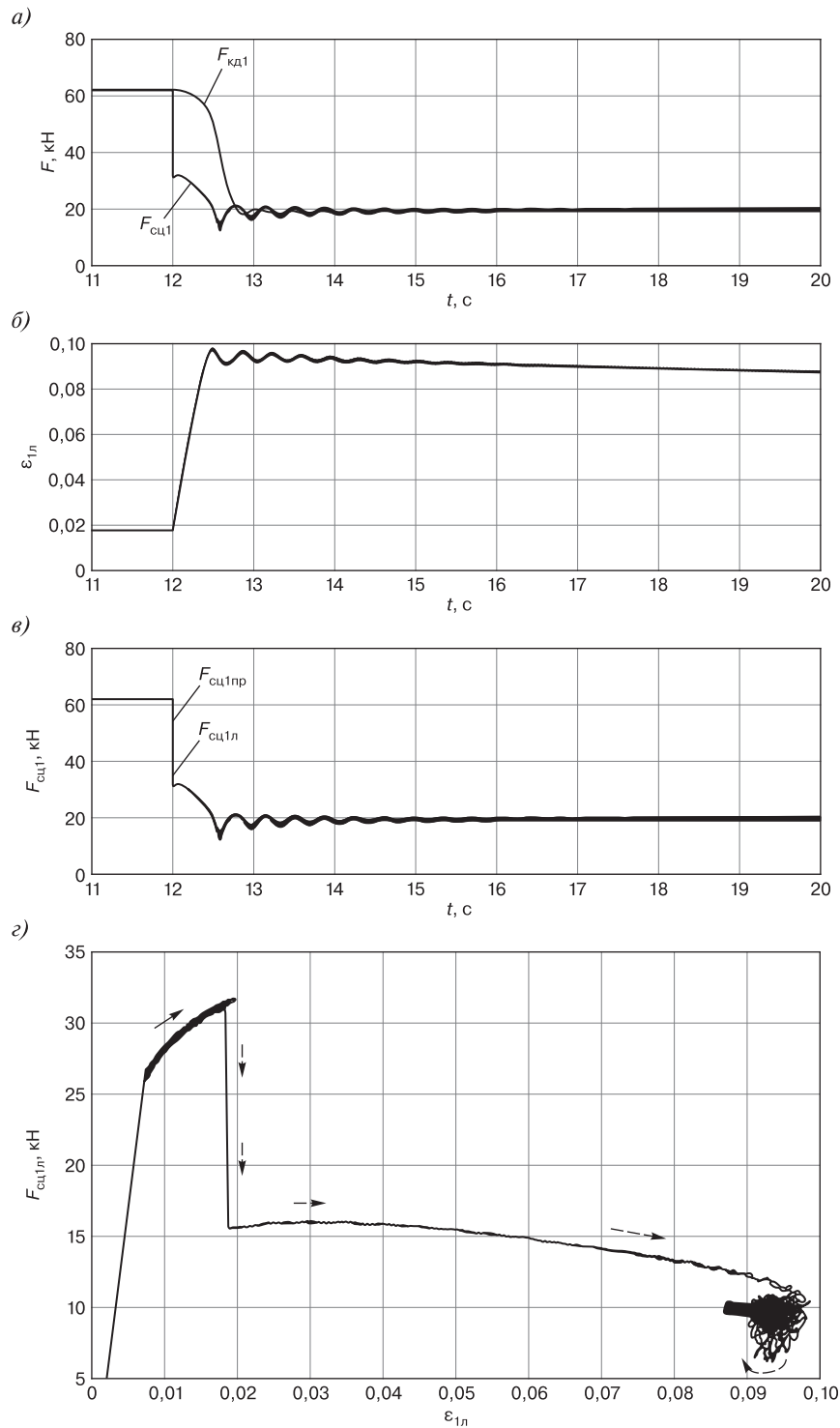


Рис. 4. Процессы при срыве сцепления под обоими колесами первой колесной пары. Зависимости\*:

а — силы тяги первого двигателя  $F_{kd1}$  и силы сцепления первой колесной пары  $F_{cu1}$  от времени; б — относительной скорости скольжения от времени; в — силы сцепления левого  $F_{cu1n}$  и правого  $F_{cu1np}$  колес от времени; г — силы сцепления от относительной скорости скольжения

\* Источник: данные авторов

Fig. 4. Processes during the release of the clutch under both wheels of the first wheel pair. Dependencies\*:

а — traction force of the first engine  $F_{kd1}$  and the clutch force of the first wheel pair  $F_{cu1}$  time dependency; б — relative sliding speed time dependency; в — clutch force of the left  $F_{cu1n}$  and right  $F_{cu1np}$  wheels time dependency; г — clutch force relative sliding speed dependency

\* Source: authors' data

При значениях силы сцепления 31,6 кН и относительной скорости скольжения 0,019 (1,9 %) происходит снижение коэффициента сцепления в два раза, а, следовательно, и силы сцепления, которая снижается до значения 16,3 кН. Это вызывает увеличение  $\varepsilon_{1л}$  до значения 0,095 (9,5 %), т. е. переход колесной пары в режим буксования. Этот режим также сопровождается высокочастотными колебаниями силы сцепления и относительной скорости скольжения, но значительно меньшей амплитуды, чем при срыве под одним колесом. На фазовом портрете это выражено меньшими размерами петлевых зависимостей  $F_{сц1л}(\varepsilon_{1л})$ .

При срыве сцепления под обоими колесами первой колесной пары ЭДС первого двигателя  $e_1$  возрастает на 16 В (рис. 5, б), что в два раза больше, чем при срыве сцепления под одним колесом колесной пары. Это объясняется большим увеличением скорости вращения колеса.

Работа УПВ в режиме подпитки позволяет обеспечить поддержание тока возбуждения на прежнем уровне за счет увеличения тока подпитки. Ток первого двигателя  $I_{д1}$  снижается от величины 895 А до 280 А (рис. 5, в), что вызывает снижение силы тяги  $F_{кд1}$  от 61 кН до 20 кН, или на 68 % (рис. 5, д). При срыве сцепления под обоими колесами первой колесной пары величины токов (рис. 5, в, д) и сил тяги (рис. 5, в, д) второго, третьего и четвертого двигателей остаются на прежнем уровне, реализуя заданные значения.

Рассмотрим переходные процессы при срабатывании системы защиты от буксования с регулятором пропорционального действия, частотная характеристика которого имеет вид:

$$W_{рег}(j\omega) = k. \quad (13)$$

При этом на выходе регулятора появляется сигнал скажности импульсов управления преобразователем УПВ (13), вычисляемый по формуле

$$\lambda(j\omega) = W_{рег}(j\omega)\Delta\varepsilon_1(j\omega), \quad (14)$$

где  $\Delta\varepsilon_1(j\omega)$  — рассогласование по относительной скорости скольжения, равное:

$$\Delta\varepsilon_1(j\omega) = \varepsilon_3 - \varepsilon_{1ф}(j\omega), \quad (15)$$

где  $\varepsilon_3$  — заданное значение относительной скорости скольжения  $\varepsilon_3 = 0,03$ ;

$\varepsilon_{1ф}(j\omega)$  — фактическое значение этой скорости, за меренное датчиком скольжения.

Зададимся, как и ранее, снижением в два раза силы сцепления под обоими колесами первой колесной пары в момент времени 12 с. Уменьшение коэффициента сцепления приводит к снижению силы сцепления и увеличению относительной скорости скольжения  $\varepsilon_{1л}$  (рис. 6, а). При этом система защиты от буксования начинает повышать ток возбуждения ТЭД  $I_{в1}$

(рис. 6, в) от 925 А до 1041 А за счет работы УПВ в режиме подпитки и поддерживает его на данном уровне. Одновременное увеличение указанных величин вызывает рост ЭДС первого двигателя  $e_1$  на 14 В (рис. 6, б). Ток первого двигателя  $I_{д1}$  снижается от 895 А до 358 А (рис. 6, в), что вызывает уменьшение силы тяги  $F_{кд1}$  с 61 кН до 25,5 кН, или на 58 % (рис. 6, д). Аналогично рассмотренным ранее процессам срыва сцепления, УПВ позволяет обеспечить поосное управление, снижая силу тяги двигателя, попавшего в режим буксования. При этом остальные ТЭД электровоза продолжают реализацию заданных значений токов (рис. 6, в, з) и сил тяги (рис. 6, д).

На рис. 7 приведен фазовый портрет автоколебаний для первой колесной пары  $F_{сц1}(\varepsilon_1)$ .

При значениях силы сцепления 63,2 кН и относительной скорости скольжения  $\varepsilon_1 = 0,019$  (1,9 %) происходит снижение силы сцепления в два раза до значения 32 кН. Срабатывание системы защиты от буксования не позволяет увеличиться относительной скорости скольжения выше  $\varepsilon_{1б} = 0,037$  (3,7 %). При этом установившееся значение этой скорости к моменту времени 20 с составляет  $\varepsilon_{1у} = 0,027$  (2,7 %) (рис. 6).

Определим показатели качества работы регулятора пропорционального действия, такие как установившаяся ошибка регулирования  $\Delta_y$ , перерегулирование  $\sigma$  и время регулирования  $t_p$ , с.

Установившаяся ошибка определяется как относительная разность между заданным  $\varepsilon_3 = 0,03$  (3,0 %) и установившимся  $\varepsilon_{1у} = 0,027$  (2,7 %) значениями регулируемой величины:

$$\Delta_y = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_y}{\varepsilon_y} \cdot 100\% = \frac{0,03 - 0,027}{0,027} \cdot 100\% = 11\%.$$

Перерегулирование рассчитывается как относительное превышение большего значения  $\varepsilon_{1б}$  над установившимся  $\varepsilon_{1у}$  и будет равно

$$\sigma = \frac{\varepsilon_{1б} - \varepsilon_y}{\varepsilon_y} \cdot 100\% = \frac{0,037 - 0,027}{0,027} \cdot 100\% = 37\%.$$

Время регулирования составило  $t_p = 20 - 12 = 8$  с.

Отметим, что полученные значения установившейся ошибки и перерегулирования превышают рекомендуемые значения  $\Delta_y = 5\%$  и  $\sigma = 30\%$ , а время регулирования является значительным.

Таким образом, срабатывание системы автоматического управления скольжением с регулятором пропорционального действия позволило восстановить сцепление колес с рельсами. Однако показатели качества управления относительной скоростью скольжения оказались неудовлетворительными. Поэтому в дальнейшей работе необходимо будет выполнить разработку более совершенного регулятора скольжения.

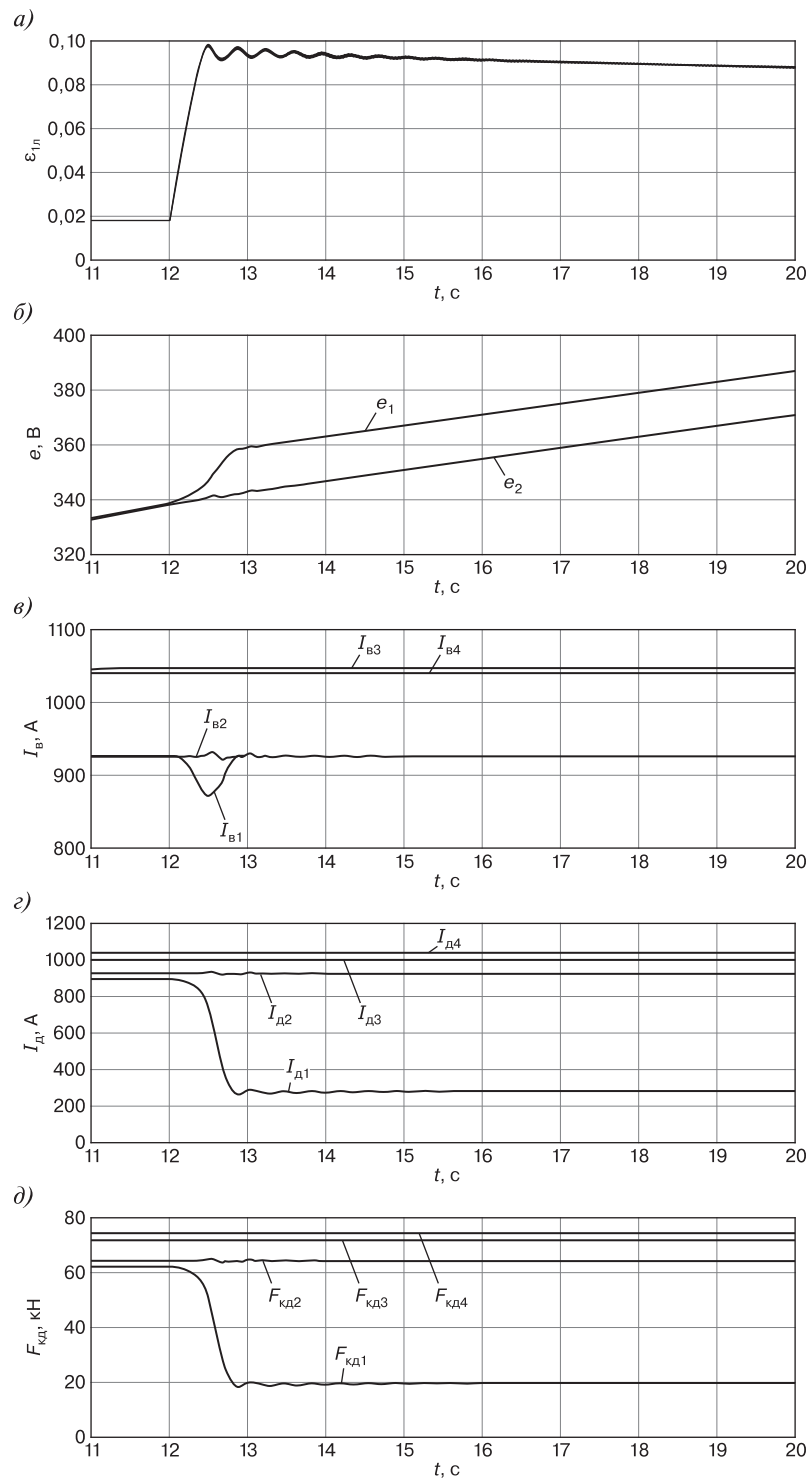


Рис. 5. Процессы при срыве сцепления под обоими колесами первой колесной пары. Зависимости от времени\*:  
 а — относительной скорости скольжения; б — ЭДС первого и второго двигателей  $e_1$ ,  $e_2$ ; в — токов возбуждения  $I_B$  двигателей;  
 г — токов двигателей  $I_d$ ; д — сил тяги двигателей  
 \* Источник: данные авторов

Fig. 5. Processes during the release of the clutch under both wheels of the first wheel pair. Time dependencies\*:  
 а — relative sliding speed; б — electromotive force of the first and second motors  $e_1$ ,  $e_2$ ; в — excitation currents  $I_B$  of the motors;  
 г — currents of the motors  $I_d$ ; д — traction forces of the motors  
 \* Source: authors' data



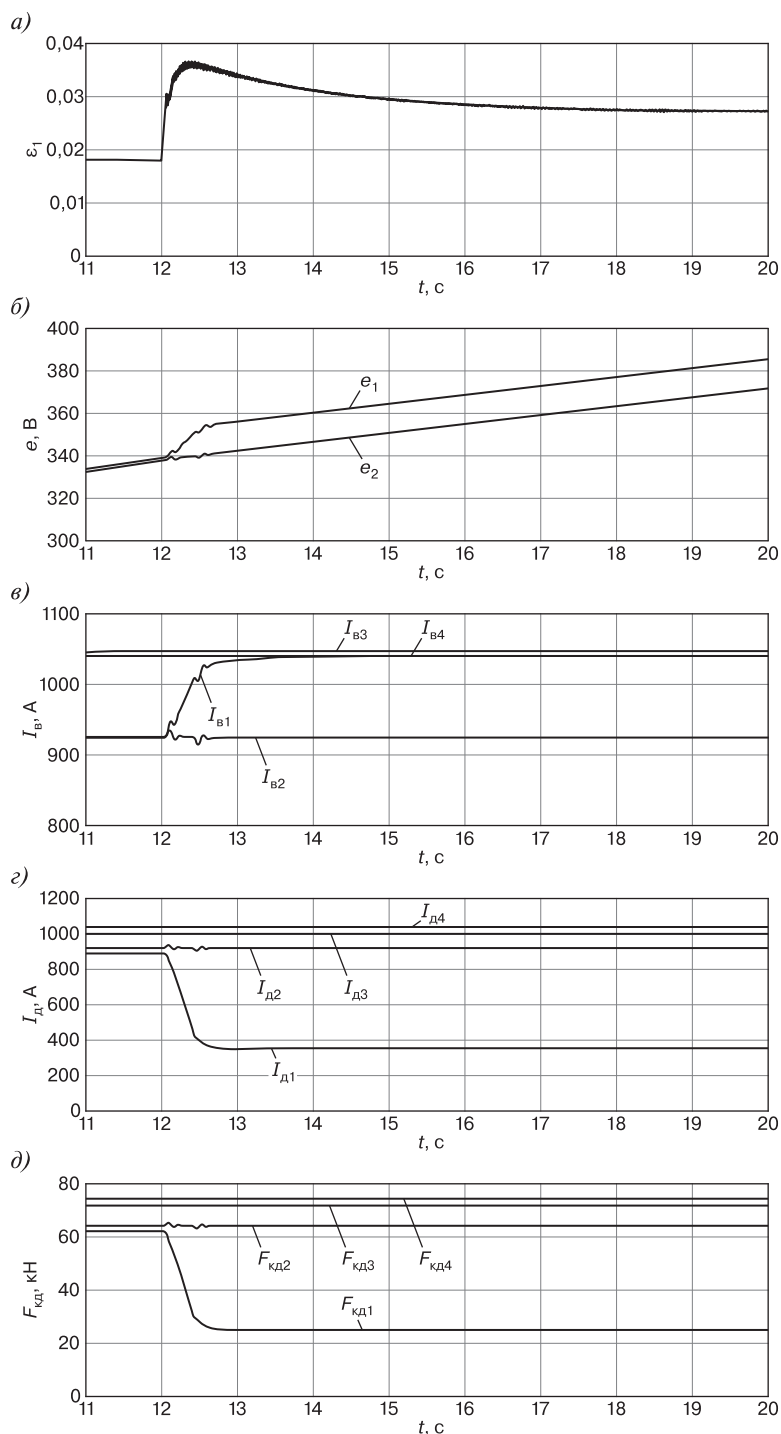


Рис. 6. Процессы при срыве сцепления под левым колесом первой колесной пары и работе системы защиты от буксования. Зависимости от времени\*:

а — относительной скорости скольжения; б — ЭДС первого и второго двигателей; в — токов возбуждения двигателей; г — токов двигателей; д — сил тяги двигателей

\* Источник: данные авторов

Fig. 6. Processes during the release of the clutch under the left wheel of the first wheelset and the operation of the wheel slip protection system.

Time dependencies\*:

а — relative sliding speed; б — electromotive forces of the first and second motors; в — excitation currents of the motors; г — currents of the motors; д — traction forces of the motors

\* Source: authors' data

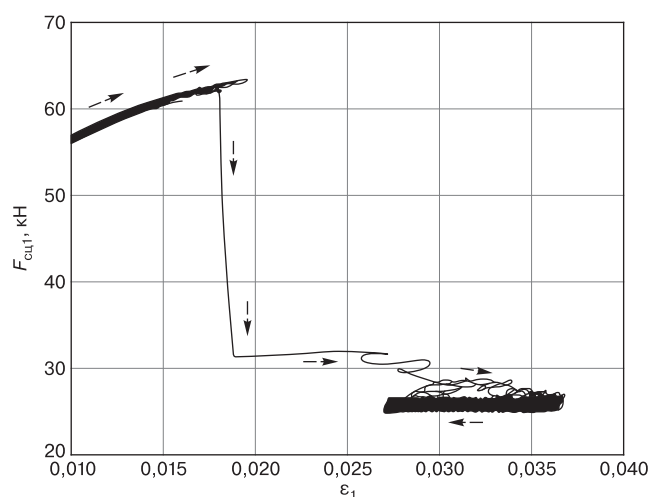


Рис. 7. Зависимость силы сцепления первой колесной пары от относительной скорости скольжения при срабатывании системы защиты от буксования\*

\* Источник: данные авторов

Fig. 7. Dependence of the first wheel pair adhesion force on the relative sliding speed during wheel slip protection system operation\*

\* Source: authors' data

**Обсуждение и заключение.** Анализ результатов исследования показал, что применение управляемых преобразователей возбуждения коллекторных тяговых электродвигателей последовательного возбуждения на электровазах переменного тока позволяет исключить режим разносного буксования колесных пар. При нарушении условий сцепления колес с рельсами относительная скорость скольжения стабилизируется на значениях 5,5 % (при срыве сцепления под одним колесом колесной пары) и 9 % (при срыве сцепления под обоими колесами колесной пары).

Для восстановления сцепления колесной пары с рельсом достаточно управлять преобразователем УПВ того двигателя, который попал в неблагоприятные условия по сцеплению, снижая силу тяги только одного ТЭД путем повышения тока возбуждения. При срыве сцепления под одним колесом колесной пары сила тяги двигателя снижается на 32 %, при этом остальные ТЭД реализуют заданные значения сил тяги, а сила тяги электроваза уменьшается всего на 2,5 %. При срыве же сцепления под обоими колесами колесной пары силы тяги снижаются на 68 % и на 5,6 % соответственно.

Применение автоматического регулятора пропорционального действия обеспечивает стабилизацию скорости скольжения колес по рельсам на уровне 2,7 %, однако показатели качества управления, такие как перерегулирование и время регулирования, остаются неудовлетворительными. Для выполнения требований к качеству управления необходимо разработать новый, более совершенный автоматический регулятор скорости скольжения.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

**Acknowledgments:** the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Funding:** the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лужнов Ю. М. Сцепление колес с рельсами (природа и закономерности). М.: Интекст, 2003. 144 с. EDN: <https://elibrary.ru/smtutb>.
2. Luzhnov Yu. M. *Coupling of wheels with rails (nature and patterns)*. Moscow: Intext, 2003. 144 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/smtutb>.
3. Исаев И. П., Лужнов Ю. М. Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами. М.: Машиностроение, 1985. 238 с.
4. Isaev I. P., Luzhnov Yu. M. *Problems of adhesion of locomotive wheels with rails*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985. 238 p. (In Russ.).
5. Кикичев Ш. В. Повышение эффективности брикетного активизатора сцепления путем варьирования состава наполнителя // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2009. № 4 (36). С. 5–9. EDN: <https://elibrary.ru/mipldz>.
6. Kikichev Sh. V. Efficiency improvement of brigquette adhesion coupling by varying the composition of filling. *Vestnik RGUPS*. 2009;4(36):5–9. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/mipldz>.
7. Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Корчагин В. О. Увеличение сцепления колес локомотива с рельсами воздействием постоянных магнитных полей на зону контакта // Наука и техника транспорта. 2017. № 2. С. 8–15. EDN: <https://elibrary.ru/ysphtv>.
8. Kosmodamianskiy A. S., Vorob'yev V. I., Korchagin V. O. Increasing the coupling of locomotive wheels with rails by the permanent magnetic fields influence on the contact zone. *Science and Technology in Transport*. 2017;(2):8–15. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ysphtv>.
9. Самме Г. В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами. М.: Маршрут, 2005. 80 с. EDN: <https://elibrary.ru/tyrphj>.
10. Samme G. V. *Frictional interaction of locomotive wheelsets with rails*. Moscow: Marshrut, 2005. 80 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tyrphj>.
11. Охотников Н. С. Использование накопителей энергии для повышения тяговых свойств электровазов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2010. № 5. С. 33–36. EDN: <https://elibrary.ru/mvcsbp>.
12. Okhotnikov N. S. Use of energy storages for improving traction characteristics of electric locomotives. *Russian Railway Science Journal*. 2010;(5):33–36. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/mvcsbp>.
13. Задорожный В. Л. Особенности электровазов серии «Ермак» с поосным регулированием силы тяги // Локомотив. 2019. № 10(754). С. 11–16. EDN: <https://elibrary.ru/mzskfp>.
14. Zadorozhnyy V. L. Features of the “Ermak” series electric locomotives with axial traction force control. *Lokomotiv*. 2019;10(754):11–16. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/mzskfp>.

8. Савоськин А. Н., Михальчук Н. Л., Пудовиков О. Е., Чучин А. А. Процессы трогания и разгона грузового поезда с электровозом, оборудованным управляемыми преобразователями возбуждения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2025. Т. 68, № 1. С. 66–74. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2025-1-66-74>. EDN: <https://elibrary.ru/megzsm>.

Savos'kin A. N., Mikhanchuk N. L., Pudovikov O. E., Chuchin A. A. The processes of starting and accelerating a freight train with an electric locomotive equipped with a controlled excitation converters. *Russian Electromechanics*. 2025;68(1):66–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2025-1-66-74>. EDN: <https://elibrary.ru/megzsm>.

9. Михальчук Н. Л., Попов Ю. И., Савоськин А. Н., Пудовиков О. Е., Чучин А. А. Повышение эффективности электропривода электровоза с управляемым преобразователем возбуждения тяговых двигателей // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 2. С. 104–114. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-2-104-114>. EDN: <https://elibrary.ru/dtqyeo>.

Mihal'chuk N. L., Popov Yu. I., Savos'kin A. N., Pudovikov O. E., Chuchin A. A. Improving the efficiency of the electric locomotive drive with a controllable converter for traction motor excitation. *Bulletin of scientific research results*. 2023;(2):104–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-2-104-114>. EDN: <https://elibrary.ru/dtqyeo>.

10. Бурчак Г. П., Васильев А. П., Ляпушкин Н. Н., Савоськин А. Н. Модель взаимодействия колеса и рельса с учетом дискретного строения металлов контактирующих тел // Вестник машиностроения. 2019. № 2. С. 21–28. EDN: <https://elibrary.ru/zaiavv>.

Burchak G. P., Vasil'ev A. P., Lyapushkin N. N., Savos'kin A. N. Model of a wheel-rail interaction, taking into account the discrete structure of metals in contacting bodies. *Vestnik mashinostroeniya*. 2019;(2):21–28. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/zaiavv>.

11. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicle running on adhesion limit. *Wear*. 2005;258:992–1000.

12. Polach O. SBB 460 Adhäsionsverhalten: Techn. Report No. 401. SLM Winterthur. [S. l.]; 1992.

13. Polach O. Optimierung modern Lok-Drehgestelle durch fahrzeug-dynamische Systemanalyse. *Eisenbahningenieur*. 2002;53(7):50–57.

14. Савоськин А. Н., Шилин Н. Д. Анализ управления скольжением колесных пар грузового электровоза с асинхронными тяговыми двигателями // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 230–239. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-230-239>. EDN: <https://elibrary.ru/cecenc>.

Savos'kin A. N., Shilin N. D. Analysis of wheel pairs slip control of electric freight locomotive with asynchronous traction motors. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):230–239. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-230-239>. EDN: <https://elibrary.ru/cecenc>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Анатолий Николаевич САВОСЬКИН,

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 528727, <https://orcid.org/0000-0001-9777-7235>

### Антон Александрович ЧУЧИН,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электропоезда и локомотивы», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), SPIN-код: 6273-2540, <https://orcid.org/0009-0006-8684-677X>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Anatoliy N. SAVOS'KIN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Electric trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obratsova St.), Author ID: 528727, <https://orcid.org/0000-0001-9777-7235>

### Anton A. CHUCHIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electric trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obratsova St.), SPIN-code: 6273-2540, <https://orcid.org/0009-0006-8684-677X>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Анатолий Николаевич САВОСЬКИН.** Формирование и направление исследования, формулирование целей и задач, обозначение алгоритмов исследования (50 %).

**Антон Александрович ЧУЧИН.** Обзор основных направлений исследования, описание материалов и методов решения поставленных задач, моделирование процессов, обработка и анализ результатов (50 %).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Anatoliy N. SAVOS'KIN.** Formation and direction of the research, goals and objectives formulation, research algorithms designation (50 %).

**Anton A. CHUCHIN.** Overview of the main research areas, description of materials and methods for solving the assigned tasks, process modeling, results processing and analysis (50 %).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

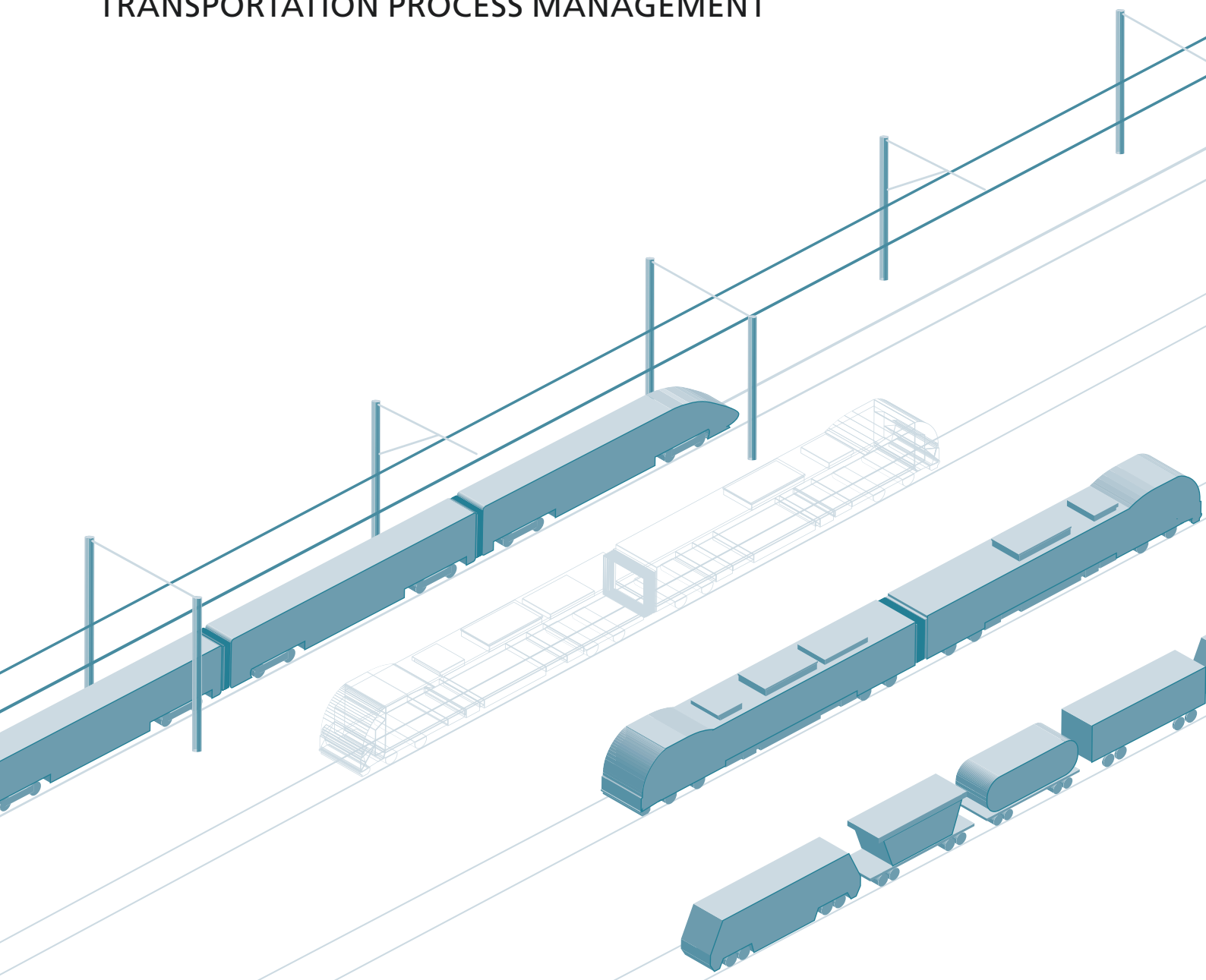
*The authors have read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию 27.10.2025, рецензия от первого рецензента получена 05.11.2025, рецензия от второго рецензента получена 10.11.2025, рецензия от третьего рецензента получена 14.11.2025, рецензия от четвертого рецензента получена 17.11.2025, принята к публикации 26.11.2025.

The article was submitted 27.10.2025, first review received 05.11.2025, second review received 10.11.2025, third review received 14.11.2025, fourth review received 17.11.2025, accepted for publication 26.11.2025.

# УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT



## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная научная статья

УДК 332.14

EDN: <https://elibrary.ru/mzjzym>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-302-313>

Научная специальность: 2.9.4. Управление процессами перевозок;

2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте



## Методика определения потребности развития региональной транспортно-логистической инфраструктуры

О. В. Москвичев✉, Е. Е. Москвичева, Ю. С. Никонов

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС),  
Самара, Российская Федерация

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Необходимость развития и совершенствования транспортно-логистической инфраструктуры железнодорожного, автомобильного, речного, морского, воздушного видов транспорта в сложившихся условиях макроэкономической трансформации и ограниченности инвестиционных ресурсов требует определения научно обоснованных предложений по модернизации действующих объектов региональной терминально-логистической инфраструктуры, а также реализации дополнительных мероприятий по развитию магистральной инфраструктуры примыкания. Разрабатываемые мероприятия должны учитывать прогнозные объемы транспортно-логистических услуг на основе анализа динамики объемов грузопотоков, их структуры и направлений корреспонденций и обеспечивать повышение уровня экономической связанности территории Российской Федерации. В настоящем исследовании авторы предлагают новые методологические подходы к определению потребности развития объектов региональной транспортно-логистической инфраструктуры с выявлением лимитирующих мест в обслуживании грузопотоков.

**Материалы и методы.** При выполнении работы использованы статистические и эконометрические методы анализа грузовой базы, балансовые методы исследования транспортно-экономических связей в стране, методы планирования, управления транспортными потоками, методы моделирования и оптимизации транспортно-логистической инфраструктуры, методы системного анализа транспортно-технологических систем.

**Результаты.** Разработан методологический подход к развитию действующей региональной транспортно-логистической инфраструктуры, включающий принципы оценки грузовой базы региона по основным номенклатурам грузов с использованием транспортно-экономического баланса, и экономико-математическую модель транспортно-логистического обслуживания грузопотоков, которая обеспечивает распределение выделенных номенклатур грузов и выявление «узких мест».

**Обсуждение и заключение.** Использование предлагаемых методических принципов и разработанной экономико-математической модели позволит получить полную и объективную информацию о достаточности развития региональной транспортно-логистической инфраструктуры, определить лимитирующие (дефицитные) или избыточные (резервные) перерабатывающие мощности грузовых фронтов по выделенным номенклатурным группам грузов, осуществить поэтапную разработку комплекса мероприятий по модернизации существующего транспортно-логистического комплекса региона и обоснованию технологических мощностей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** региональная транспортно-логистическая инфраструктура, терминально-логистический объект, грузовая база, гармонизированная номенклатура грузов, транспортно-экономический баланс, методологический подход, методические принципы, экономико-математическая модель

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Москвичев О. В., Москвичева Е. Е., Никонов Ю. С. Методика определения потребности развития региональной транспортно-логистической инфраструктуры // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 302–313. EDN: <https://elibrary.ru/mzjzym>.



## TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Original article

UDK 332.14

EDN: <https://elibrary.ru/mzjzym>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-302-313>

Scientific specialty: 2.9.4. Transportation process management;

2.9.1. Transport and transportation technology systems of the country, its regions, and cities, and production organisation in transport



## Assessment of the sufficiency of regional transport and logistics infrastructure development

Oleg V. Moskvichev✉, Elena E. Moskvicheva, Iurii S. Nikonov

Volga State Transport University (VSTU),  
Samara, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The need to develop and improve the transport and logistics infrastructure of railway, automobile, river, sea, and air transport modes in the current conditions of macroeconomic transformation and limited investment resources requires the identification of evidence-based proposals for the modernisation of existing facilities of the regional terminal and logistics infrastructure, as well as the implementation of additional measures to develop the main infrastructure of the junction. The measures under development should consider the projected volumes of transport and logistics services based on analysis of the dynamics of freight flows, their structure and correspondence directions and ensure an increase in the level of economic connectivity of the Russian Federation. The purpose of this study is to develop a methodological approach to determining the need for the development of regional transport and logistics infrastructure facilities with the identification of limiting “bottlenecks” in the maintenance of relevant freight flows.

**Materials and methods.** The authors employed the following scientific and methodological approaches, including statistical and econometric methods for analysing the cargo base, balance methods for studying transport and economic relations in the country, methods of planning and traffic flow management, methods of modeling and optimising transport and logistics infrastructure, methods of system analysis of transport and technological systems.

**Results.** A methodological approach to the development of the existing regional transport and logistics infrastructure has been developed, including methodological principles for assessing the cargo base of the region according to the main cargo nomenclatures using the transport and economic balance, economic and mathematical model of transport and logistics services for freight flows, which ensures the distribution of selected cargo nomenclatures based on transport and economic links across the operated facilities of the transport and logistics infrastructure of the considered region, characterised by specified values of technological parameters, as well as the identification of limiting “bottlenecks” in the maintenance of relevant freight flows.

**Discussion and conclusion.** The use of the proposed methodological principles and developed economic and mathematical model would enable to obtain complete and objective information on the sufficiency of the development of the regional transport and logistics infrastructure, determine the limiting (scarce) or excess (reserve) processing capacities of cargo fronts according to the selected nomenclature cargo groups. This gives an opportunity to proceed to the development of a gradual range of measures to remodel the existing transport and logistics complex of the region and substantiate technological capacities.

**KEYWORDS:** regional transport and logistics infrastructure, terminal and logistics facility, cargo base, harmonised cargo nomenclature, transport and economic balance, methodological approach, methodological principles, economic and mathematical model

**FOR CITATION:** Moskvichev O.V., Moskvicheva E.E., Nikonov Iu.S. Assessment of the sufficiency of regional transport and logistics infrastructure development. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):302–313. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-302-313>.

**Введение.** С целью обеспечения устойчивого и динамичного функционирования экономики страны, Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 года № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»<sup>1</sup> установлены целевые показатели и задачи, в том числе направленные на увеличение объемов грузовых перевозок по международным транспортным коридорам не менее чем в 1,5 раза по сравнению с уровнем 2021 года за счет повышения глобальной конкурентоспособности маршрутов, обеспечение прироста экспорта несырьевых неэнергетических товаров не менее чем на 2/3 по сравнению с показателем 2023 года, а также продукции агропромышленного комплекса не менее чем в 1,5 раза по сравнению с уровнем 2021 года.

Учитывая приоритетные направления развития российской экономики, а также необходимость эффективного преодоления введенной санкционной политики в отношении России, стратегическим шагом является развитие и совершенствование транспортно-логистической инфраструктуры, которая является неотъемлемой и ключевой частью транспортного комплекса, обеспечивая его высокопроизводительное функционирование. В свою очередь, транспортно-логистическая сфера является двигателем развития не только многих бизнес-проектов, предприятий, но и экономики в целом. Основной имущественной частью транспортно-логистической инфраструктуры являются терминально-логистические объекты различного уровня, как правило, взаимосвязанные между собой и объединенные в сложную иерархическую систему в рамках одного или нескольких видов транспорта. Эффективные эксплуатация и взаимодействие объектов этой системы позволяют обеспечить устойчивость логистических цепочек поставок, реализовать дополнительные грузопотоки в рамках новых экономических связей и создать основу для решения общенациональных задач по пространственному развитию.

В настоящее время на правительственном и отраслевых уровнях, а также в текущих научных исследованиях развитие транспортно-логистической инфраструктуры рассматривается с позиций либо формирования опорной сети транспортно-логистических центров<sup>2</sup>, гарантирующей инфраструктурную возможность организации грузовых мультимодальных перевозок, либо проектирования региональной терминально-складской инфраструктуры в аспекте решения оптимизационных задач по определению месторасположения новых

логистических объектов с использованием математического и имитационного моделирования, а также выбранных социально-экономических факторов. Однако, в сложившихся условиях макроэкономической трансформации, а также ограниченности инвестиционных ресурсов требуется разработка научно обоснованного подхода к определению потребности и этапности развития действующей (эксплуатируемой) региональной транспортно-логистической инфраструктуры, включая необходимость реализации дополнительных мероприятий по развитию магистральной инфраструктуры примыкания, учитывающего прогнозные объемы транспортно-логистических услуг на основе анализа динамики объемов грузопотоков, их структуры и направлений корреспонденций и обеспечивающего повышение уровня экономической связанности территории Российской Федерации.

**Обзор литературы.** Проблемы, связанные с разработкой стратегических решений по развитию транспортно-логистической инфраструктуры, характеризуются высокой сложностью из-за большой размерности и многовариантности решаемой задачи [1]. Проведенный анализ научной литературы позволил выделить две группы используемых по теме исследования моделей и методов: модели, определяющие транспортно-экономические связи, и модели планирования развития грузоперерабатывающей инфраструктуры.

Для исследования транспортно-экономических связей используют балансовые методы, определяющие соотношения между размерами производства и потребления продукции производственно-технического назначения, промышленных и продовольственных товаров, на основании которых, во взаимосвязи с макроэкономическими параметрами социально-экономического развития, устанавливается спрос на транспортные услуги, выражаемый в объемах перевозок грузов, товарной и географической структуре [2, 3].

Для принятия стратегических решений по развитию транспортной инфраструктуры, формирования и утверждения инвестиционных проектов применяется инструментарий межотраслевого баланса, теорию и методологию которого разработал российский экономист В. В. Леонтьев [4]. При этом, для обоснования адекватных прогнозов объемов грузоперевозок в методический аппарат межотраслевых балансов, как правило, интегрируются дополнительные информационные данные, касающиеся точек зарождения и погашения грузопотоков, а также точек роста производственной активности.

<sup>1</sup> О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/50542> (дата обращения: 09.08.2025).

<sup>2</sup> Генеральная схема развития сети транспортно-логистических центров (ТЛЦ) (в рамках федерального проекта «Транспортно-логистические центры» транспортной части комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года). М., 2020. 49 с.

В зарубежной практике основным источником для составления транспортно-экономических балансов являются методы проведения системного анализа. В США каждые пять лет на государственном уровне проводится исследование транспортных потоков (Commodity Flow Survey — CFS)<sup>3</sup>, в ходе которого собираются данные от крупнейших грузообразующих предприятий. Данные включают в себя информацию о наименовании и объемах отгружаемых товаров, их стоимости, корреспонденциях перевозок и видах транспорта. Результаты CFS используются для анализа тенденций на рынке транспортно-логистических услуг, прогнозирования структуры, направлений и объемов грузовых перевозок, а также для принятия управленческих и инвестиционных решений в области транспортной инфраструктуры. В Европейском союзе подобный системный анализ грузовых перевозок проводится на основе данных, собранных Европейской информационной системой транспортной политики (ETIS)<sup>4</sup>. Для установления связей между вопросами транспортного планирования и соответствующих массивов статистической информации или смоделированных ETIS данных используется разработанная иерархическая структура критериев, подкритериев, показателей и переменных.

В свою очередь, анализ научных работ, базирующихся на моделях и методах планирования развития грузоперерабатывающей инфраструктуры, показывает, что эта задача часто сводится к математической задаче оптимального выбора мест размещения вновь создаваемых «центров» обслуживания при заданных объектах обслуживания [1]. При этом оптимальное решение размещения «центров» обслуживания потребителей зависит от выбранных критериев, принятых ограничений и основывается на применении различных подходов, среди которых можно отметить метод ветвей и границ, методы динамического программирования, методы целочисленного программирования, вероятностные методы, методы кластерного анализа, различные эвристические методы и т. п.

Один из базовых подходов к выбору месторасположения логистических объектов на ограниченной территории на основе социальных и экономических особенностей региона был предложен американским ученым Эдгаром Гувером<sup>5</sup>. Его концепция основывалась на изучении таких параметров, как распределение потребителей, объем и структура спроса, требуемый уровень логистического обслуживания и др. Основной целевой функцией являлась минимизация затрат на транспортировку продукции за счет максимальной близости размещения объектов логистичес-

кой инфраструктуры к зонам сосредоточения клиентских рынков.

В работах отечественных и зарубежных исследователей данный методологический подход за последние десятилетия получил достаточное развитие. В работе [5] выбор региона для размещения логистического центра основывается на расчетных принципах интегрированного показателя, учитывающего различия уровней социально-экономического и инфраструктурного развития регионов. В качестве основных методов авторы используют статистический анализ данных для оценки изменений потенциала региона размещения логистического объекта и имитационное моделирование. В работе [6] на основе пространственного анализа, объединяющего ГИС и SWOT-анализа, определяется месторасположение логистического центра в регионе. В [7] для рационального размещения региональной транспортно-логистической инфраструктуры посредством метода многокритериальной оптимизации предлагается создание опорной сети логистических объектов разного класса и назначения на основе выявления потенциала логистических ресурсов каждой административно-территориальной единицы региона.

Обзор современных научных исследований [8–10] также позволяет сделать вывод о развитии методологических подходов к формированию межрегиональных, федеральных многоуровневых логистических сетей, обеспечивающих получение оптимальных «центров обслуживания» с привязкой к магистральной сети транспорта.

В работах [11, 12] в качестве основной проблемы рассматривается оценка экономической выгоды от инвестиций в развитие транспортно-логистической инфраструктуры, направленной на минимизацию расходов, связанных с транспортировкой, хранением, обработкой и перегрузкой грузов. При этом особое значение придается детальному расчету экономических показателей и выработке стратегий, обеспечивающих максимальную рентабельность и устойчивость функционирования терминально-логистических комплексов.

Активно развивается научное и практическое направление [13–16] по повышению эксплуатационной надежности терминально-складских/логистических комплексов, разрабатываются методы, методики и модели для принятия решений по регулированию технико-технологических параметров с целью снижения издержек различного рода. Например, в работе [13] исследуются вопросы рационального функционирования грузового терминала при изменении объемов грузопотоков и характеристик технико-технологических

<sup>3</sup> Commodity Flow Survey (CFS) // Bureau of Transportation Statistics. URL: <https://www.bts.gov/cfs> (дата обращения: 23.08.2025).

<sup>4</sup> Core database development for the European Transport policy Information System (ETIS) // European Commission. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/10980> (дата обращения: 23.08.2025).

<sup>5</sup> Hoover E. M. The Location of Economic Activity. New York; Toronto; London: McGraw-Hill Book Company Inc., 1948. 310 p.

параметров. Авторы применяют метод системного анализа, синтез информации и метод имитационного моделирования для оценки загруженности зон складирования.

Таким образом, проведенный обзор литературы по теме исследования дает основу к формированию прикладного научно обоснованного инструментария для системного определения потребности и этапности развития действующих объектов транспортно-логистической инфраструктуры на магистральной сети. Цель настоящего исследования — разработка методологического подхода к определению потребности развития объектов региональной транспортно-логистической инфраструктуры с выявлением лимитирующих мест в обслуживании грузопотоков.

**Материалы и методы.** При выполнении работы использованы следующие научно-методологические подходы, учитывающие специфику предмета и объекта исследования: статистические и эконометрические методы анализа грузовой базы, балансовые методы исследования транспортно-экономических связей в стране, методы планирования, управления транспортными потоками, методы моделирования и оптимизации транспортно-логистической инфраструктуры, методы системного анализа транспортно-технологических систем.

**Результаты исследования.** Решение проблемы развития и модернизации региональной транспортно-логистической инфраструктуры как единой системы терминально-логистических объектов и магистральной инфраструктуры примыкания должно основываться на анализе всех элементов грузовой и транспортной подсистем, участвующих в процессе перевозки грузов. Наличие и учет наиболее полной и объективной информации предопределяет достоверность и обоснованность принимаемых решений на различные временные периоды при оценке необходимости инвестиций в развитие транспортно-логистической инфраструктуры. Укрупненно всю необходимую совокупность данных можно разделить на две части:

1. *Грузовая база* — это совокупность данных об объемах и структуре существующих и прогнозных грузопотоков релевантных грузов и способах их формирования из потребностей экономики.

2. *Транспортно-логистическая инфраструктура региона (далее — ТЛИ)* — это комплекс материальных и интеллектуальных ресурсов региона, направленный на обеспечение возможностей перевозки грузов различных транспортно-технологических систем и обработки грузовой базы. Он включает технические, технологические и организационные решения для обслужи-

вания грузов и характеризуется параметрическими данными, измеряющими возможности этой инфраструктуры.

Для решения задач научного и практического анализа процессов грузоперевозок необходимо разработать модель грузовой базы, модель региональной ТЛИ и обобщенную модель транспортно-логистического обслуживания грузопотоков на объектах региональной ТЛИ. Последняя модель позволит прогнозировать ту или иную эффективность работы комплекса ТЛИ при тех или иных параметрах грузовой базы. Она позволит также ставить и решать задачи планирования обслуживания грузовой базы и задачи проектирования элементов ТЛИ для устранения «узких мест» обслуживания.

Создание обобщенной модели — сложная системная задача, опирающаяся на анализ больших массивов данных государственной и ведомственной статистики: ряды данных Росстата по объемам отгруженной продукции предприятиями различных секторов экономики, статистика экспорта и импорта, включая данные Федеральной таможенной службы России, экономическая статистика топливно-энергетического комплекса, а также транспортная статистика, включающая данные ОАО «РЖД», статистику морского и внутреннего водного транспорта, автомобильного транспорта, а также на современные методы обработки этих данных (например, машинное обучение, Big Data, байесовские методы и др.).

Тем не менее, уже на современном этапе можно разрабатывать отдельные части этой большой задачи.

**Построение транспортно-экономического баланса как основа анализа грузовой базы региона.** Безусловно, фундаментальной основой для формирования стратегий развития транспортного комплекса, планирования совершенствования и развития инфраструктуры магистральных видов транспорта в строгом соответствии со сферами их экономически целесообразного использования является мониторинг основных направлений пассажирских и грузовых потоков на основе транспортно-экономического баланса (далее — ТЭБ).

Согласно Транспортной стратегии<sup>6</sup>, работа по построению ТЭБ РФ поручена ФГБУ «НЦКТП Минтранса России». Специалистами организации был разработан методологический подход [2], в основе которого предусмотрено формирование фактической и прогнозной компоненты грузовой базы и транспортных потоков по всем видам транспорта и родам грузов. Фактическая компонента описывает ретроспективную статистику грузовой базы и транспортных

<sup>6</sup> Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. 285 с.



корреспонденций между регионами за предшествующий период наблюдений. Прогнозная компонента содержит прогноз этих же составляющих на будущие периоды. Учитывая горизонт планирования, установленный в стратегических документах транспортной отрасли, рассматриваемый прогнозный период охватывает интервал от 2020 до 2036 года.

При разработке ТЭБ строится многомерная матрица корреспонденций грузоперевозок между регионами Российской Федерации, распределение грузопотоков по родам грузов гармонизированной номенклатуры грузов, распределение по видам транспорта и видам перевозок с учетом принятых балансовых уравнений [2].

Использование некоторых методических подходов ФГБУ «НЦКТП Министерства транспорта РФ» к формированию регионального транспортно-экономического баланса позволит получить детализированные характеристики выпусков производств и конечного спроса в регионе, объемов перевозок грузов, необходимые в качестве исходной информации для решения поставленной задачи проводимого исследования.

**Методические принципы оценки грузовой базы региона.** Учитывая анализ взаимного географического расположения центров формирования грузопотоков, в рамках рассматриваемых территориальных ограничений процедура оценки грузовой базы региона, основанной в том числе на выделении наиболее перспективных сегментов рынка транспортно-логистических услуг, состоит в следующем:

*1. Проведение анализа структуры грузовой базы.*

Объемы грузовой базы и перевозок по видам транспорта для достижения их сопоставимости необходимо рассматривать в разрезе унифицированной номенклатуры грузов, которые обслуживаются на объектах транспортно-логистической инфраструктуры региона общего пользования, для всех видов транспорта. С этой целью вся исходная ведомственная информация и статистика структурируется и приводится к гармонизированной номенклатуре грузов ТЭБ (далее — ГНГ ТЭБ) [2], обеспечивающей сопоставимость и совместимость всех элементов исходных данных из различных источников.

Грузовую базу региона формируют определенные предприятия, находящиеся в данном регионе. В связи с этим, на региональном уровне требуется выделение основных грузообразующих предприятий, грузовая база которых суммируется и образует базу выпуска производств (ресурсная часть ТЭБ).

На основании данных Минэкономразвития России о динамике и структуре использованного валового внутреннего продукта формируются основные элементы конечного спроса, отражающие характеристики грузовой базы потребления продукции в регионе (потребительская часть ТЭБ).

На основании статистической информации Росстата, в том числе данных Федеральной таможенной службы России, формируется грузовая база ввозимых в регион номенклатурных групп грузов, в том числе поступление по импорту, относящееся к ресурсной части ТЭБ, а также грузовая база вывозимых из региона категорий грузов, в том числе экспорта продукции (потребительская часть ТЭБ).

Таким образом, соотношение между размерами производства и потребления в регионе, а также оценка объемов ввозимой и вывозимой той или иной выделенной продукции, соотнесенной с наименованием ГНГ ТЭБ, дает возможность определить достаточность и рациональную потребность в транспортно-логистических мощностях с детализацией необходимых технологических характеристик грузовых фронтов, на которых осуществляется погрузка и выгрузка грузов.

*2. Проведение анализа корреспонденций грузопотоков по родам груза и видам транспорта с выделением транспортных районов отправления и прибытия грузов.*

Для рассматриваемого региона выделяются транспортные районы внутри и вне него, между которыми устанавливаются корреспонденции грузопотоков.

Для описания корреспонденций грузопотоков по видам транспорта в ТЭБ используются транспортные сети видов транспорта — железнодорожного, автомобильного, речного, морского, воздушного. В совокупности эти сети должны объединяться в единый связный граф транспортной сети, который позволяет описывать как перевозки отдельными видами транспорта, так и мультимодальные перевозки [2, 3].

На основе имеющейся статистики территориальных отделений Росстата производится отбор информации по перевозкам грузов добывающей и обрабатывающей промышленности основных отраслей экономики региона с разделением по прибытию и по отправлению, а также видам транспорта. При этом также выделяются рода грузов ГНГ ТЭБ, имеющие наибольший удельный вес в общем грузообороте терминально-логистических объектов общего пользования.

Использование ведомственной информации и статистики по соответствующему виду транспорта имеет свою специфику. Наиболее полная статистическая информация — по железнодорожному транспорту, менее полная — отражает грузопотоки автомобильного транспорта. Поэтому объемы перевозок автомобильным транспортом рассчитываются с учетом баланса производства и потребления различных родов продукции в регионе и данных о ввозе-вывозе другими видами транспорта.

В результате оценки региональных корреспонденций получаем распределение между входящими и выходящими (исходящими) перевозками и видами транспорта, а также количественную потребность в переработке основных номенклатур релевантных грузов



по объемам корреспонденций с выделением центров зарождения и погашения грузопотоков.

3. При определении грузовой базы региона и релевантной номенклатуры грузов важно учитывать современные тенденции на мировом и российском рынке, анализ современных активно развивающихся логистических технологий — мультимодальных и контейнерных перевозок [17]. Реализация поэтапного комплекса мероприятий по модернизации существующего терминально-логистического комплекса (далее — ТЛК) должна способствовать дальнейшему развитию этих технологий, в свою очередь создание условий для использования таких технологий резко повышает привлекательность действующего ТЛК для участников рынка грузовых перевозок. Поэтому необходимо учесть возможное переключение существенных грузопотоков на контейнерные технологии перевозки и определить коэффициенты целесообразной пригодности к этой технологии всех возможных категорий грузов. На этом основании рассчитываются объемы существующих выходящих (исходящих) релевантных грузопотоков контейнероперевозимых грузов.

В работе [17] предложена методика многокритериальной оценки контейнеропригодности добываемой и производимой продукции региона, учитывающей технологические, транспортно-логистические и экономические параметры доставки груза от производителя до конечного потребителя. Результатом является расчет интегрального показателя уровня контейнеропригодности продукции по каждому выделенному наименованию, который позволяет определить объемы целесообразной для перевозки в контейнерах продукции в тоннах и ДФЭ<sup>7</sup> по каждому наименованию, а также суммарным итогом.

Объемы существующих входящих релевантных грузопотоков контейнероперевозимых грузов можно также рассчитывать на основании коэффициентов целесообразной контейнеропригодности, в случае недостаточности информации по грузообразующим предприятиям других регионов — на основании коэффициентов контейнеризации. В свою очередь, коэффициент контейнеризации для выбранной категории грузов определяется отношением доли объема грузов данного рода, перевозимых данным видом транспорта в контейнерах, к общему объему грузов данного рода, перевозимых данным видом транспорта.

4. Для определения достаточности региональных транспортно-логистических мощностей, а также при оценке необходимости инвестиций в их развитие в среднесрочной перспективе необходимо учитывать

прогнозные оценки по потенциальной грузовой базе. С этой целью рассчитываются прогнозные объемы грузовой базы на основе межотраслевого прогноза, подготовленного Минэкономразвития России, и актуального отраслевого прогноза объема перевозок по видам транспорта.

Построение отраслевого прогноза объема перевозок по видам транспорта и согласование его с межотраслевым балансом осуществляется на основе данных об объемах и прогнозах перевозок, которые строятся Минтрансом России, подведомственными агентствами и ОАО «РЖД». В настоящее время эти прогнозы формируются на основе ведомственной информации, согласуются и увязываются с прогнозом объемов перевозок, который строится в комплексе с межотраслевыми межрегиональным балансом при помощи модели Института народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук. При этом производится итерационное сведение и взаимное балансирование этих прогнозов, при котором межотраслевой и межрегиональный баланс могут пересчитываться несколько раз. Чем сложнее и противоречивее входные данные, тем больше итераций может потребоваться модели для их обработки. Эксперты-аналитики, в свою очередь, могут выбирать или корректировать критерий сходимости в зависимости от требуемой точности расчетов.

Таким образом, на основании рассчитанных, с учетом ТЭБ, существующих или перспективных размеров региональных грузопотоков производится оценка достаточности эксплуатируемых транспортно-логистических мощностей с выявлением лимитирующих (дефицитных) или избыточных (резервных) перерабатывающих способностей по выделенным номенклатурным группам грузов, согласно ГНГ ТЭБ.

**Распределение грузопотоков по объектам ТЛИ региона на основе экономико-математической модели.** Для формализации данной задачи предлагается экономико-математическая модель транспортно-логистического обслуживания грузопотоков, обеспечивающая распределение выделенных номенклатур грузов на основе транспортно-экономических связей, учитывающих в том числе минимизацию транспортно-логистических издержек производителей-отправителей и потребителей-получателей, по эксплуатируемым объектам транспортно-логистической инфраструктуры рассматриваемого региона, характеризующимся заданными значениями параметров, определяющих их технологические особенности обработки грузов. Экономико-математическая модель может быть представлена в следующем общем виде.

<sup>7</sup> ДФЭ — единица, эквивалентная двадцатифутовому контейнеру. Стандартная единица, которой является контейнер ИСО длиной 20 футов (6,1 м) и которая используется для статистических измерений, касающихся транспортных потоков или пропускной способности (условная единица измерения контейнерных перевозок).

Будем считать, что технологические параметры всех объектов транспортно-логистической инфраструктуры региона зафиксированы и заданы объемы входящих в регион грузов (грузовая база IN — «выгрузка») и выходящих (исходящих) грузов с объектов региональной транспортно-логистической инфраструктуры (далее — РТЛИ) (грузовая база OUT — «погрузка»).

Объемы грузов и перерабатывающие способности объектов РТЛИ выражены в т/сут. и являются номинальными величинами, постоянными на планируемый период. Технологические мощности объектов РТЛИ являются единым комплексом для организации погрузочно-разгрузочных работ на местах общего пользования.

Введем следующие обозначения:

$p$  — номера предприятий-получателей грузов,  $p = \overline{1, P}$ ;

$P$  — общее количество предприятий-получателей грузов региона;

$r$  — номера предприятий-отправителей грузов,  $r = \overline{1, R}$ ;

$R$  — общее количество предприятий-отправителей грузов региона.

Множества получателей и отправителей пересекаются, но не совпадают.

$k$  — номера объектов ТЛИ региона,  $k = \overline{1, K}$ ;

$K$  — общее количество объектов ТЛИ региона;

$i$  — номера номенклатуры грузов, входящих в регион,  $i = \overline{1, M}$ ;

$M$  — общее количество номенклатур грузов, входящих в регион;

$j$  — номера номенклатуры грузов, выходящих из региона,  $j = \overline{1, N}$ ;

$N$  — общее количество номенклатур грузов, выходящих из региона.

Эти номенклатуры не совпадают, но пересекаются.

$a_i$  — объем грузов  $i$ -й номенклатуры, входящих в регион, т;

$b_j$  — объем грузов  $j$ -й номенклатуры, выходящих из региона, т;

$c_{ik}$  — перерабатывающая способность обработки  $i$ -го груза  $k$ -м объектом РТЛИ, т.е. это максимальное количество тонн груза  $i$ , которое может переработать  $k$ -й объект РТЛИ за сутки, если никаких других грузов нет, т/сут.;

$c_{jk}$  — перерабатывающая способность обработки  $j$ -го груза  $k$ -м объектом РТЛИ, т/сут.;

$l_{pk}$  — «мера близости» предприятия-получателя к  $k$ -му объекту РТЛИ, км;

$d_{rk}$  — «мера близости» предприятия-отправителя к  $k$ -му объекту РТЛИ, км;

$S_{ip}$  — количество  $i$ -го груза, запланированного к поставке  $p$ -му предприятию;

$g_{jr}$  — количество  $j$ -го груза, запланированного к отгрузке с  $r$ -го предприятия.

Схематичное распределение грузопотоков по объектам РТЛИ с учетом введенных условных обозначений представлено на рисунке.

Планирование входящего грузопотока заключается в распределении всей грузовой базы в объеме  $a_i$  по  $K$  объектам РТЛИ и всем предприятиям-получателям так, чтобы выполнялись требования (ограничения) на перерабатывающую способность объектов РТЛИ, чтобы интегральный показатель транспортно-логистических затрат был минимальным. Это условие будет соблюдаться, если предприятия-получатели будут привязаны к объектам РТЛИ, обеспечивающим наименьшие затраты.

Введем переменные:

$$Z_{pik} = \begin{cases} 1, & \text{если предприятие } p \text{ получает } i\text{-й груз} \\ & \text{с } k\text{-го объекта РТЛИ;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Таким образом, будем считать, что предприятие может получать разные грузы с разных объектов РТЛИ.

**Целевая функция.** В качестве количественного показателя, измеряющего эффективность распределения грузовой базы по объектам РТЛИ и предприятиям, рассмотрим общие затраты, понесенные всеми предприятиями-получателями по всей номенклатуре грузов:

$$I = \sum_p^P \sum_i^M \sum_k^K l_{pk} S_{ip} Z_{pik} \rightarrow \min. \quad (1)$$

В формуле (1) суммируются все затраты на тонно-километры в соответствии с близостью предприятий к выбранным объектам РТЛИ (при  $Z = 1$ ).

Количество  $i$ -го груза, перерабатываемое на  $k$ -м объекте РТЛИ, в соответствии с введенными величинами  $S_{ip}$  и  $Z_{pik}$  выразится как

$$x_{ik} = \sum_{p=1}^P S_{ip} Z_{pik}. \quad (2)$$

Очевидно, что

$$x_{ik} \leq c_{ik},$$

однако это ограничение справедливо, если на  $k$ -м объекте РТЛИ обрабатывается только  $i$ -й груз.

На самом деле  $k$ -й объект РТЛИ может обрабатывать разные грузы  $i$  и даже выходящие грузы  $j$ . Поэтому ограничения задачи объединяют входной и выходной грузопотоки.

Выходящий грузопоток описывается привязкой предприятий-отправителей  $j$ -х грузов через  $K$  объектов РТЛИ региона.

Аналогично предыдущему описанию введем переменные  $h_{rjk}$ :

$$h_{rjk} = \begin{cases} 1, & \text{если } r\text{-е предприятие-поставщик отправляет} \\ & j\text{-й груз через } k\text{-й объект РТЛИ;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

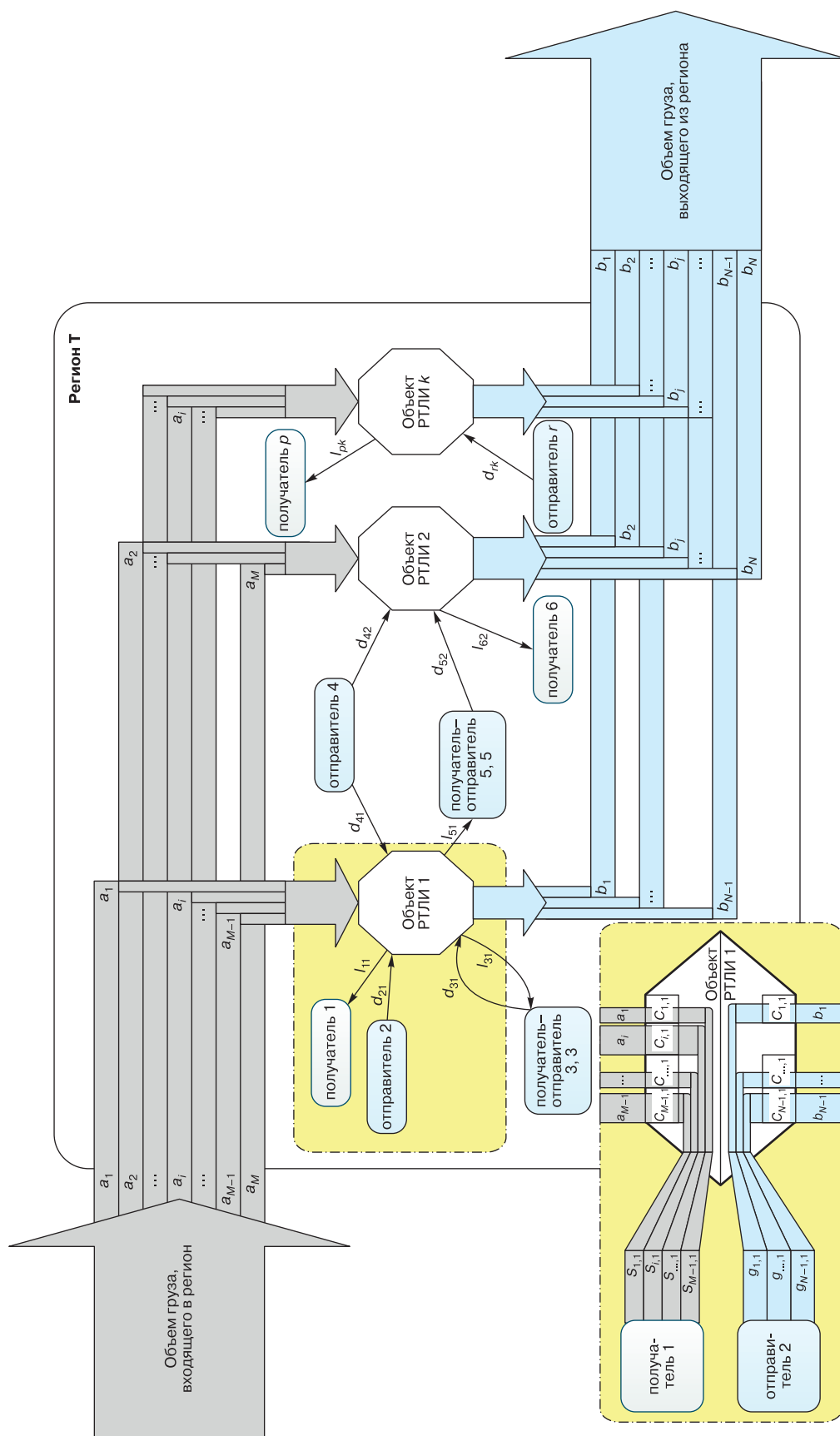


Рис. Схема распределения грузопотоков по объектам транспортно-логистической инфраструктуры региона\*:

$a_i$  — объем грузов  $i$ -й номенклатуры из  $M$  грузов, входящих в регион (т);  $b_j$  — объем грузов  $j$ -й номенклатуры из  $N$  грузов, выходящих из региона (т);  $C_{jk}$  ( $C_{jk}$ ) — перерабатывающая способность обработки  $i$ -го ( $j$ -го) груза  $k$ -м объектом РТЛИ (т/сут.);  $S_{ip}$  — количество  $i$ -го груза, запланированного к поставке  $p$ -му предприятию-отправителю;  $g_{ir}$  — количество  $j$ -го груза, запланированного к отгрузке с  $r$ -го предприятия-отправителя

\* Источник: данные авторов

Fig. Scheme of freight flows distribution by objects of transport and logistics infrastructure of the region\*:

$a_i$  — the volume of goods of the  $i$ -th nomenclature of the  $M$  cargoes entering the region (tons);  $b_j$  — volume of goods of the  $j$ -th nomenclature of the  $N$  cargoes leaving the region (tons);  $C_{jk}$  ( $C_{jk}$ ) — processing capacity processing of the  $i$ -th ( $j$ -th) cargo by the  $p$ -th regional transport and logistics infrastructure object (tons/day);  $S_{ip}$  — amount of the  $i$ -th cargo scheduled for delivery to the  $p$ -th recipient enterprise;  $g_{ir}$  — amount of the  $j$ -th cargo scheduled for shipment from the  $r$ -th sender enterprise

\* Source: authors' data

Тогда целевая функция для выходного грузопотока выражает общие затраты, понесенные всеми предприятиями-отправителями по всей номенклатуре грузов, и с учетом введенных выше величин имеет вид:

$$O = \sum_r \sum_j \sum_k d_{rk} g_{jr} h_{rjk} \rightarrow \min. \quad (3)$$

В формулах (1) и (3) суммирование происходит одновременно по трем индексам, но для первых произведений  $l_{pk} S_{ip}$  и  $d_{rk} g_{jr}$  третьи индексы излишни, поскольку мера близости от предприятия до конкретного объекта РТЛИ не зависит от типа груза, который отправляет/получает предприятие, а количество груза, которое предприятие отправляет/получает, не зависит от того, через какой объект РТЛИ грузопоток проходит, т.е. эти показатели будут при различных третьих индексах постоянны.

Очевидно, общим критерием будет

$$W = I + O = \sum_p \sum_i \sum_k l_{pk} S_{ip} Z_{pik} + \sum_r \sum_j \sum_k d_{rk} g_{jr} h_{rjk} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Количество  $j$ -го груза, перерабатываемого на  $k$ -м объекте РТЛИ, с учетом величин  $g_{jr}$  и  $h_{rjk}$ , будет выражено:

$$y_{jk} = \sum_{r=1}^R g_{jr} h_{rjk}. \quad (5)$$

Рассмотрим ограничения на выбор  $Z_{pik}$  и  $h_{rjk}$ :

1. Каждое  $p$ -е по  $i$ -му грузу предприятие и каждое  $r$ -е предприятие по  $j$ -му грузу должно быть привязано к объекту РТЛИ (может быть не одним):

$$\sum_{k=1}^K Z_{pik} \geq 1, \quad p = \overline{1, P}, \quad i = \overline{1, M}. \quad (6)$$

2. Аналогично для предприятий-отправителей:

$$\sum_{k=1}^K h_{rjk} \geq 1, \quad r = \overline{1, R}, \quad j = \overline{1, N}. \quad (7)$$

3. Общий объем переработки входящих и выходящих грузов не должен превышать перерабатывающей способности  $k$ -го объекта. Величина  $\frac{x_{ik}}{c_{ik}}$  — доля  $i$ -го груза на  $k$ -м объекте по отношению к максимальной величине (перерабатывающей способности). Аналогично для выходных грузов  $j$  —  $\frac{y_{jk}}{c_{jk}}$ , тогда

$$\sum_{i=1}^M \frac{x_{ik}}{c_{ik}} + \sum_{j=1}^N \frac{y_{jk}}{c_{jk}} \leq 1, \quad k = \overline{1, K}. \quad (8)$$

Используя выражения (2) и (5), получим:

$$\sum_{i=1}^M \frac{\sum_{p=1}^P S_{ip} Z_{pik}}{c_{ik}} + \sum_{j=1}^N \frac{\sum_{r=1}^R g_{jr} h_{rjk}}{c_{jk}} \leq 1, \quad k = \overline{1, K}. \quad (9)$$

Заметим, что величины  $a_i$ ,  $b_j$  могут быть выражены по заданным величинам плановых объемов  $S_{ip}$  и  $g_{jr}$ , а именно:

$$\sum_{p=1}^P S_{ip} = a_i, \quad i = \overline{1, M}; \quad (10)$$

$$\sum_{r=1}^R g_{jr} = b_j, \quad j = \overline{1, N}. \quad (11)$$

Формулы (10) и (11) представляют собой условия баланса для решения задачи распределения грузопотоков для обслуживания на объектах РТЛИ.

Следовательно, получаем оптимизационную задачу (4), (6), (7), (9) при условии баланса (10), (11).

Отметим, что математические модели оптимизационных задач в вышеприведенной постановке являются линейными и представляют собой задачи линейного булевого программирования<sup>8</sup> [18], решение которых хорошо изучено и может быть получено с использованием известных программных средств, например, MS Excel.

В задачу анализа процессов обслуживания грузов региона входит не только оптимальное планирование при известных технологических мощностях транспортно-логистической инфраструктуры и параметрах ее объектов, но и нахождения резервов (потенциала развития) и определения «узких мест», требующих инвестиций. В этом смысле применение аппарата линейного булевого программирования позволяет, как дополнительные функции, использовать параметрический анализ. Эти средства позволяют найти уязвимые параметры объектов РТЛИ и параметры, чувствительные к критериальной величине. Например, если при заданных исходных данных решение задачи недопустимо, то можно выявить, какое ограничение не выполняется, и тем самым определить критический ресурс — «узкое место» в системе обслуживания/обработки грузопотоков. Используя программу MS Excel, можно определить новые решения, если параметры задачи увеличить или уменьшить, реализуя функцию анализа «что если».

**Обсуждение и заключение.** Использование предлагаемых методических принципов и разработанной экономико-математической модели позволит получить полную и объективную информацию о достаточности развития региональной транспортно-логистической инфраструктуры, определить лимитирующие (дефицитные)

<sup>8</sup> Есипов Б. А. Методы исследования операций: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2013. 304 с.



или избыточные (резервные) перерабатывающие мощности грузовых фронтов по выделенным номенклатурным группам грузов. Это позволит перейти к разработке поэтапного комплекса мероприятий по модернизации существующего транспортно-логистического комплекса региона и обоснованию технологических мощностей.

В перспективе дальнейшего исследования становится осуществимым переход к разработке поэтапного комплекса мероприятий по модернизации существующего транспортно-логистического комплекса региона (определению первоочередных объектов ТЛИ с дефицитными перерабатывающими мощностями; выбору типовых и/или цифровых оптимизационных технико-технологических решений) и обоснованию технологических мощностей, что, в целом, повысит эффективность принимаемых управленческих решений в реализации инвестиционных инфраструктурных проектов.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

**Acknowledgements:** the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

**Финансирование:** статья выполнена в рамках государственного задания Федерального агентства железнодорожного транспорта на выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения (номер государственного учета: 1022060600077-7-5.7.4).

**Funding:** the article was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Agency for Railway Transport to carry out research, development and technological work for civil purposes (state registration No. 1022060600077-7-5.7.4).

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Москвичев О. В., Москвичева Е. Е. Системный анализ математических моделей размещения транспортно-логистических объектов различного уровня // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 267–276. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276>. EDN: <https://elibrary.ru/bpxeol>.
2. Москвичев О. В., Москвичева Е. Е. System analysis of mathematical models of placement of transport and logistics facilities of different levels. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):267–276. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276>. EDN: <https://elibrary.ru/bpxeol>.
3. Евсеев О. В., Мурашов В. В., Забоев А. И. и др. Транспортно-экономический баланс и его роль в координации транспортного планирования в условиях цифровой трансформации // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14, № 3. С. 717–726. <https://doi.org/10.25559/sitito.14.201803.717-726>. EDN: <https://elibrary.ru/yyhqh>.

4. Евсеев О. В., Murashov V. V., Zabojev A. I. et al. Transport and economic balance and its role in the coordination of transport planning during the digitalization era. *Modern information technologies and IT-education*. 2018;14(3):717–726. (In Russ.). <https://doi.org/10.25559/sitito.14.201803.717-726>. EDN: <https://elibrary.ru/yyhqh>.
5. Жуков Е. А., Федоренко А. И. О методологии разработки транспортно-экономических балансов // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2013. № 14. С. 44–51. EDN: <https://elibrary.ru/rcebd>.
6. Zhukov E. A., Fedorenko A. I. On the methodology of the design of transport and economic balance. *MIR (Modernization. Innovation. Development)*. 2013;(14):44–51. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/rcebd>.
7. Леонтьев В. В. Общеэкономические проблемы межотраслевого анализа. Избранные произведения: в 3 т. Т. 1. 2006. 406 с.
8. Leont'yev V. V. *General economic problems of intersectoral analysis*. Selected works: in 3 volumes. Volume 1. 2006. 406 p. (In Russ.).
9. Копылова О. А., Рахмангулов А. Н. Проблемы выбора места размещения логистических центров // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2011. Т. 1, № 1. С. 58–67. EDN: <https://elibrary.ru/pasgaz>.
10. Kopylova O. A., Rakhmangulov A. N. Problems of choosing the location of logistics centers. *Modern problems of Russian transport complex*. 2011;1(1):58–67. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/pasgaz>.
11. Rikalović A., Soares G. A., Ignjatić J. Spatial analysis of logistics center location: A comprehensive approach. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*. 2018;1(1):38–50. <https://doi.org/10.31181/dmame180138r>.
12. Рожко О. Н., Шихалев А. М. Оценка вариантов размещения логистических объектов на территории региона методом многокритериальной оптимизации (на примере Республики Татарстан) // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2017. Т. 10, № 6. С. 153–169. <https://doi.org/10.15838/esc.2017.6.54.10>. EDN: <https://elibrary.ru/vudann>.
13. Rozhko O. N., Shikhalev A. M. Assessment of options for logistics objects in the region using multi-criteria optimization (case study of the Republic of Tatarstan). *Economic and social changes: facts, trends, forecast*. 2017;(6):153–169. (In Russ.). <https://doi.org/10.15838/esc.2017.6.54.10>. EDN: <https://elibrary.ru/vudann>.
14. Попов П. В., Мирецкий И. Ю. Методология построения логистической инфраструктуры на территории региона // Экономика региона. 2019. Т. 15, № 2. С. 483–492. <https://doi.org/10.17059/2019-2-13>. EDN: <https://elibrary.ru/xclqib>.
15. Popov P. V., Miretskij I. Yu. Methodology for constructing the region's logistics Infrastructure. *Economy of regions*. 2019;15(2):483–492. (In Russ.). <https://doi.org/10.17059/2019-2-13>. EDN: <https://elibrary.ru/xclqib>.
16. Москвичев О. В. Терминальная инфраструктура и контейнерные поезда: кластеризация объектов // Мир транспорта. 2017. Т. 15, № 5(72). С. 158–173. EDN: <https://elibrary.ru/ymjsfz>.
17. Moskvichev O. V. Terminal infrastructure and container trains: object clustering. *World of transport and transportation*. 2017;15(5(72)):158–173. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ymjsfz>.
18. Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E., Bulatov A. A. Clustering methods for determination of optimal locations of container storage and distribution centers. *Transportation Research Procedia*. 2021;54:461–469. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.096>. EDN: <https://elibrary.ru/sqkvqz>.
19. Deng C., Liu Y. A deep learning-based inventory management and demand prediction optimization method for anomaly detection. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2021;(1):1–14. <https://doi.org/10.1155/2021/9969357>.
20. Lewczuk K., Kłodawski M., Gepner P. Energy consumption in a distributional warehouse: A practical case study for different warehouse technologies. *Energies*. 2021;14(9):2709. <https://doi.org/10.3390/en14092709>.
21. Король П. Г., Числов О. Н. Моделирование терминально-логистических процессов переработки внешнеторговых грузов на пограничной станции Гродеково // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 258–266. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-258-266>. EDN: <https://elibrary.ru/cgqhjd>.



Korol' R. G., Chislov O. N. Simulation of terminal and logistics processes of foreign trade cargo processing at the Grodekovo border station. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):258–266. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-258-266>. EDN: <https://elibrary.ru/cgqhjd>.

14. Оленцевич В. А., Горшков В. В., Брытков В. С. Современное состояние и проблемы развития транспортно-логистической системы России // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 1(81). С. 103–112. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2024.1\(81\).103-112](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2024.1(81).103-112). EDN: <https://elibrary.ru/khsiah>.

Olentsevich V. A., Gorshkov V. V., Brytkov V. S. The current state and development problems of the transport and logistics system of Russia. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2024;1(81):103–112. (In Russ.). [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2024.1\(81\).103-112](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2024.1(81).103-112). EDN: <https://elibrary.ru/khsiah>.

15. Кизимиров М. В., Черняев Е. В. Управление складом в транспортно-логистических центрах на основе стратегий ресурсосбережения // Вестник Челябинского государственного университета. 2024. № 11 (493). С. 116–124. <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2024-493-11-116-124>. EDN: <https://elibrary.ru/ehporu>.

Kizimirov M. V., Cherniaev E. V. Warehouse management in transport and logistics centers based on resource-saving strategies. *Bulletin of Chelyabinsk State University*. 2024;11(493):116–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2024-493-11-116-124>. EDN: <https://elibrary.ru/ehporu>.

16. Акельев А. С., Король Р. Г. Оптимизация параметров функционирования терминально-логистической инфраструктуры железнодорожной транспортной системы // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3(95). С. 79–89. [https://doi.org/10.46973/0201-727X\\_2024\\_3\\_79](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2024_3_79). EDN: <https://elibrary.ru/pxkqux>.

Akeliev A. S., Korol' R. G. Optimization of operating parameters of the terminal and logistics infrastructure of the railway transport system. *Vestnik RGUPS*. 2024;3(95):79–89. (In Russ.). [https://doi.org/10.46973/0201-727X\\_2024\\_3\\_79](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2024_3_79). EDN: <https://elibrary.ru/pxkqux>.

17. Москвичев О. В. Клиентоориентированная контейнерная транспортная система. М.: ВИНТИ РАН. 2018. 186 с. EDN: <https://elibrary.ru/weerkh>.

Moskvichev O. V. *Customer-oriented container transport system*. Moscow: VINITI RAN. 2018. 186 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/weerkh>.

18. Еремеев А. В., Заозерская Л. А., Колоколов А. А. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования // Дискретный анализ и исследование операций. Серия 2. 2000. Т. 7, № 2. С. 22–46. EDN: <https://elibrary.ru/ibbfld>.

Eremeev A. V., Zaozerskaya L. A., Kolokolov A. A. The set covering problem: complexity, algorithms, and experimental investigations. *Discrete analysis and operations research. Series 2*. 2000;7(2):22–46. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ibbfld>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Олег Валерьевич МОСКВИЧЕВ,

д-р. техн. наук, доцент, директор института управления и экономики, Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2в), SPIN-код: 7813-3547, <https://orcid.org/0000-0002-3423-1451>

### Елена Евгеньевна МОСКВИЧЕВА,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы», Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2в), SPIN-код: 5447-2334, <https://orcid.org/0000-0002-4729-7695>

### Юрий Сергеевич НИКОНОВ,

старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой», Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2в), SPIN-код: 8029-8051, <https://orcid.org/0000-0001-9428-8778>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Oleg V. MOSKVICHEV,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute of Management and Economics, Volga State Transport University (443066, Samara, 2B, Svobody St.), SPIN-code: 7813-3547, <https://orcid.org/0000-0002-3423-1451>

### Elena E. MOSKVICHEVA,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Technologies of Cargo and Commercial Work, Stations and Hubs, Volga State Transport University (443066, Samara, 2B, Svobody St.), SPIN-code: 5447-2334, <https://orcid.org/0000-0002-4729-7695>

### Iurii S. NIKONOV,

Senior Lecturer, Department of Operational Work Management, Volga State Transport University (443066, Samara, 2B, Svobody St.), SPIN-code: 8029-8051, <https://orcid.org/0000-0001-9428-8778>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Олег Валерьевич МОСКВИЧЕВ.** Формирование идеи, развитие ключевых целей и задач, выбор методологии исследования, редактирование и подготовка текста статьи (30 %).

**Елена Евгеньевна МОСКВИЧЕВА.** Разработка методических принципов оценки грузовой базы региона, экономико-математической модели распределения грузопотоков по объектам ТЛИ региона (35 %).

**Юрий Сергеевич НИКОНОВ.** Обзор литературы по тематике исследования, разработка экономико-математической модели распределения грузопотоков по объектам ТЛИ региона, подготовка рукописи статьи (35 %).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Oleg V. MOSKVICHEV.** Idea formation, key goals and objectives development, research methodology selection, article editing and preparation (30 %).

**Elena E. MOSKVICHEVA.** Development of methodological principles for assessing the cargo base of the region, economic and mathematical model for the distribution of freight flows by transport and logistics infrastructure objects in the region (35 %).

**Iurii S. NIKONOV.** Literature review on the research topic, development of an economic and mathematical model for the distribution of freight flows by transport and logistics infrastructure objects in the region, article preparation (35 %).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию 06.10.2025, рецензия от первого рецензента получена 07.11.2025, рецензия от второго рецензента получена 17.11.2025, рецензия от третьего рецензента получена 20.11.2025, принята к публикации 01.12.2025.

The article was submitted 06.10.2025, first review received 07.11.2025, second review received 17.11.2025, third review received 20.11.2025, accepted for publication 01.12.2025.

## Транспорт России: скорость, технологии и человек в центре внимания

пресс-релиз / 20 ноября 2025 года

*XIX Международный форум и выставка «Транспорт России» завершили работу, подтвердив статус главной национальной площадки для выработки стратегических решений в сфере транспортной политики, инфраструктуры, технологий и отраслевого развития. В течение трех дней представители федеральных и региональных органов власти, бизнеса, научного сообщества и технологических компаний обозначили ключевые направления, которые будут определять развитие транспортного комплекса страны.*

### ФОРУМ

Открывая главную пленарную дискуссию, Председатель Правительства Российской Федерации Михаил Мишустин подчеркнул устойчивость транспортного комплекса: вклад отрасли в ВВП в 2025 году составит около 6 %, что превышает 13 триллионов рублей, а за девять месяцев перевезено 11,5 млрд пассажиров, включая 22 % прироста на внутренних водных путях. Премьер-министр обозначил приоритеты: активное внедрение искусственного интеллекта, развитие беспилотных авиационных систем и выполнение задачи по созданию высокоскоростной магистрали между Москвой и Санкт-Петербургом — одного из крупнейших проектов современной России. Он также напомнил, что форум на протяжении девятнадцати лет остается ведущей площадкой для поиска решений и формирования отраслевой политики.

### Инфраструктура, цифровизация и пассажирские сервисы

Деловая программа открылась завтраком Министра транспорта Российской Федерации Андрея Никитина, где обсуждалось развитие российской аэропортовой инфраструктуры и формирование многофункциональных транспортных хабов. Было отмечено, что к 2030 году в России будут построены, модернизированы или реконструированы 75 аэропортов, при этом существенная часть инвестиций формируется внебюджетными источниками.

В ходе дискуссий первого дня отраслевые лидеры подчеркнули, что цифровизация стала полноценным инвестиционным инструментом: «только в РЖД экономический эффект цифровых решений с 2019 года превысил 60 млрд рублей».

Отдельное внимание было уделено развитию скоростного дорожного каркаса и новым сервисам для пассажиров. Обсуждение подтвердило: «мультимодальность, скорость и комфорт становятся ключевыми факторами, определяющими конкурентоспособность российских транспортных систем».

### ВСМ, семейноцентричность, молодежь и инновации

Второй день объединил четыре ключевые темы форума: высокоскоростное движение, семейноцентричность, подготовку кадров и технологические инновации.

Центральной темой стала всесторонняя дискуссия по развитию сети высокоскоростных магистралей. Заместитель Председателя Правительства Виталий Савельев подчеркнул, что «Россия входит в высшую лигу стран, которые строят высокоскоростные магистрали», обозначив масштаб технологической независимости: «Мы полностью строим и полотно, и поезда из российских материалов». Проект ВСМ Москва — Санкт-Петербург сопровождается созданием новой производственной базы, роботизированных заводов и внедрением уникальных отечественных решений, опережающих зарубежные аналоги.

Значимым блоком программы стала презентация стандарта семейноцентричности — комплекса инициатив, направленных на поддержку российских семей, повышение качества пассажирских сервисов и формирование новых корпоративных практик. Было подчеркнуто, что транспорт становится инструментом демографической политики, а компаниям предлагается измерять социальный эффект через удобство, безопасность и качество обслуживания семей с детьми.

Министр транспорта Андрей Никитин провел открытую встречу со студентами отрасли, подчеркнув, что транспорт сегодня — один из самых технологичных секторов экономики. Он отметил, что ежедневно транспортная система перевозит более 41,8 млн пассажиров, а уровень технологических решений в беспилотном транспорте и цифровой логистике задает новую планку для подготовки кадров.

Инновационная повестка продолжилась Венчурными играми и Битвой стартапов, где молодые инженеры и технологические команды представили решения в области беспилотных систем, городской мобильности и цифровых платформ. Формат стал площадкой для прямого диалога между индустрией и новыми разработчиками.

### **Федеральная повестка, инвестиции, ГЧП и стратегические ориентиры**

Заключительный день форума открылся осмотром выставки Председателем Правительства Михаилом Мишустиним вместе с вице-премьерами Виталием Савельевым и Маратом Хуснуллиным и министром Андреем Никитиным. Руководству были представлены новые аэропортовые терминалы, беспилотные разработки, проекты дорожного строительства и решения по развитию международных транспортных коридоров.

На пленарной дискуссии третьего дня была представлена совокупная позиция государства и бизнеса. Андрей Никитин заявил: «Объем инвестиций в транспортную инфраструктуру за два десятилетия вырос в двенадцать раз — со 173 млрд до 2 триллионов рублей», подчеркнув, что две трети инвестиций обеспечиваются компаниями и частными инвесторами, а объем действующих ГЧП достиг 4,8 трлн рублей.

Виталий Савельев и Марат Хуснуллин отметили высокий темп строительства и перевыполнение планов нацпроекта «Безопасные качественные дороги». Представители бизнеса поддержали позицию правительства: Вячеслав Петушенко подчеркнул роль концессий и необходимость их совершенствования, а Сергей Шишкарев отметил, что устойчивость отрасли во многом обеспечивается коллективами компаний, в чьей ответственности находятся ключевые элементы инфраструктуры.

Отдельная профессиональная сессия была посвящена логистике северного завоза — теме, критически важной для Арктики и Крайнего Севера. Участники отметили, что впервые удалось перейти к предсказуемой системе обеспечения северных регионов, внедряются цифровые инструменты и создается Единый морской оператор, что позволит повысить устойчивость и прозрачность цепочек поставок.

### **ВЫСТАВКА**

На площадке Гостиного Двора развернулась яркая экспозиция, объединившая ключевые достижения и новейшие решения транспортной отрасли страны. Центральным элементом стал объединенный стенд национальных проектов, на котором представлены развитие инфраструктуры, цифровые сервисы управления, внедрение беспилотных технологий и промышленные решения для обеспечения мобильности.

Во время официального обхода Председателю Правительства Российской Федерации Михаилу Мишустину показали основные достижения транспортного комплекса. Его сопровождали заместители Председателя Правительства Виталий Савельев и Марат Хуснуллин, а также Министр транспорта Андрей Никитин.

На стенде Росавиации в режиме видеоконференцсвязи состоялись торжественные запуски нового пассажирского терминала аэропорта Мурманск, терминала аэропорта Ижевск и командно-диспетчерского пункта аэропорта Грозный. На стендах АО «ГЛОНАСС» и АО «ГТЛК» продемонстрированы решения по идентификации беспилотных воздушных судов и проекты по взаимодействию спутниковых группировок и беспилотников. S7 представила учебно-тренировочный самолет Tango и новые производственные возможности в аэропорту «Шереметьево». Федеральное дорожное агентство и ГК «Автодор» показали ввод в эксплуатацию ключевых участков федеральных трасс, а ОАО «РЖД» — перспективные разработки, включая новый плацкартный вагон габарита Т и сервисы для пассажиров с детьми.

### **ИТОГ**

В 2025 году форум и выставка «Транспорт России» подтвердили статус одной из ключевых деловых площадок транспортной отрасли. В рамках программы состоялось 41 деловое мероприятие, участие приняли 381 спикер, более 5100 участников деловой программы и 1325 компаний и организаций. Экспозицию площадью 3900 м<sup>2</sup> посетили более 12 000 человек, свои разработки представили 126 экспонентов. В Москву прибыла 81 региональная делегация, включая 34 руководителя субъектов РФ. На премию «Формула Движения» поступило 115 заявок, в пресс-центре работали более 900 журналистов из 150 СМИ, онлайн-трансляции собрали свыше 37 500 просмотров, в организации помогала команда из 123 волонтеров. По итогам мероприятия подписано 46 соглашений, определяющих дальнейшие направления развития отрасли.

Полученные результаты демонстрируют курс транспортного сектора на технологическую независимость, цифровую трансформацию, долгосрочные инвестиции и партнерство государства и бизнеса. Высокоскоростные магистрали, модернизация аэропортов, развитие цифровой логистики, меры поддержки семей и вовлечение молодежи формируют современную транспортную систему, ориентированную на рост экономики и качество жизни граждан.

## Содержание журнала «Вестник ВНИИЖТ» за 2025 год

### № 1

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

- С. А. Петрачков, М. Г. Гегедеш.** Анализ напряженно-деформированного состояния удерживающего устройства для фиксации арочного длинномерного груза на железнодорожной платформе ..... 9–20
- С. Н. Науменко, П. О. Мусерский.** Разработка устройства управления потоком воздуха для производственных и социальных зданий ОАО «РЖД» ..... 21–28
- Д. С. Ершов.** Проектирование геометрии стрелочных кривых ..... 29–41
- М. Е. Березовский.** Конструкции контррельсовых узлов с увеличенным ресурсом для перспективных стрелочных переводов ..... 42–50
- В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. В. Тимаков, А. Л. Протопопов, С. В. Чунин, М. А. Литвинов.** Определение напряженно-деформированного состояния упругой клеммы рельсового скрепления W30 ..... 51–59
- М. И. Мехедов, В. А. Антонец, В. А. Устинов, В. Г. Федюлин.** О подходах к обоснованию целесообразности изменения геометрии трассы со сложным планом железнодорожных линий ..... 60–71

### № 2

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

- А. О. Шимановский, О. В. Демьянчук.** Влияние направления воздушного потока на аэродинамические силы, действующие на транспортное средство ..... 81–91
- В. И. Сакало, А. В. Сакало.** Остаточные эксплуатационные напряжения на поверхности катания рельса Р65 ..... 92–103
- Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн.** Обеспечение усталостной прочности соединительных балок четырехосных тележек многоосных грузовых вагонов ..... 104–112
- В. О. Березин, А. В. Замуховский, А. А. Ефимов, А. В. Гречаник.** Валидация конечно-элементной модели клеммы узла промежуточного рельсового скрепления ..... 113–125

#### УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

- М. А. Килочицкая.** Расчет показателей дублируемости маршрутной сети на полигоне транспортного обслуживания пассажиров ..... 127–139

#### ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

- И. В. Анохов.** Роль научно-корреспондентских пунктов в железнодорожной науке в 1942–1945 гг. .... 141–150



№3

Обращение главного редактора ..... 158

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

**А. А. Локтев, И. В. Шишкина.** Проектирование мостовых переходов с учетом распределения изгибной и крутильной жесткости по высоте пролетного строения ..... 160–168

**Б. Э. Глюзберг, Е. А. Тимакова, Г. Р. Юргельс.** Анализ возможности сходов колес с рельсов из-за вкатывания на остряк ..... 169–178

**Р. В. Гучинский.** Унифицированный вероятностный подход к оценке усталости металлоконструкций подвижного состава ..... 179–189

**В. Ю. Тэттэр, О. В. Гателюк, А. Ю. Тэттэр.** Выбор критериев оценки эффективности вибродиагностирования узлов подвижного состава на современном этапе цифровизации для гармонизации нормативных документов .... 190–198

**В. О. Березин, А. В. Замуховский, А. А. Ефимов.** Выбор расчетных методов учета сложного напряженно-деформированного состояния и среднего напряжения цикла для локализации места зарождения усталостной трещины в упругой клемме ..... 199–214

**О. А. Суслов, В. А. Трушкин, М. А. Гришина, К. В. Клементьев.** Полигонные испытания стыковых накладок шарнирного типа ..... 215–226

№4

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

**В. Е. Андреев, Е. В. Кудряшов.** Создание контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей ..... 235–250

**Е. Д. Винникова, А. Б. Косарев.** Разработка модели определения разности потенциалов между рельсом и землей на участках электрифицированных железных дорог переменного тока ..... 251–261

**А. В. Романов, А. А. Киселев.** Прочность и устойчивость безбалластной конструкции верхнего строения бесстыкового пути высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург ..... 262–272

**А. А. Крылов, А. Б. Косарев.** Эффективность совместной работы устройств обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ и железнодорожной автоматики и телемеханики на грузонапряженных участках железных дорог ..... 273–286

**А. Н. Савоськин, А. А. Чучин.** Процессы срыва и восстановления сцепления колес с рельсами электровоза переменного тока с управляемыми преобразователями возбуждения коллекторных тяговых двигателей ..... 287–300

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК**

**О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, Ю. С. Никонов.** Методика определения потребности развития региональной транспортно-логистической инфраструктуры ..... 302–313

**Транспорт России: скорость, технологии и человек в центре внимания** ..... 314–315

**Содержание журнала за 2025 год** ..... 316–317





ПАТЕНТЫ ВНИИЖТ

**Система мониторинга и прогнозирования воздействия природно-климатических факторов на объекты транспортной инфраструктуры (МПКФИ)**

*Авторы: Виноградов С. А., Мехедов М. И., Лобанов С. В., Загидулин А. Р., Делицин Е. С.*

*Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28 февраля 2024 г.*

*Номер регистрации (свидетельства):*

*2024614608.*

*Правообладатель: АО «ВНИИЖТ»*

Программа представляет собой геоинформационную систему, реализованную в виде web-приложения с базами данных природно-климатических факторов и объектов транспортной инфраструктуры. В программе реализованы следующие функциональности: мониторинг природно-климатических факторов, прогнозирование их развития на долгосрочном (с использованием архивов метеорологических, гидрологических, сейсмологических и геохронологических данных) и оперативном (с использованием открытых прогностических метеорологических моделей) горизонте, расчет их комплексного воздействия на состояние и надежность инженерных сооружений транспортной инфраструктуры с учетом их характеристик, для поддержки принятия решений в сегменте безопасности движения. Программа используется для повышения эффективности и снижения трудозатрат в ходе проведения анализа воздействия внешних природно-техногенных факторов на состояние и надежность инженерных сооружений.

**Система автоматизированного ведения соединенными поездами по радиоканалу, реализующая функционал управления с одного поста головного локомотива (AB-PT с САУ-ОП)**

*Авторы: Худорожко М. В., Никифорова Н. Б., Елисеев И. А., Стельмашенко А. В., Крюков И. П.*

*Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28 февраля 2024 г.*

*Номер регистрации (свидетельства):*

*2024614606.*

*Правообладатель: АО «ВНИИЖТ»*

Система представляет собой программное обеспечение, применение которого позволяет повысить производительность труда за счет сокращения работников локомотивных бригад без нарушения требований безопасности и обеспечивает:

- синхронное и асинхронное управление соединенным поездом по радиоканалу по командам с поста управления ведущего локомотива;
- автоматизированное дистанционное включение режима экстренного торможения на ведомом локомотиве;
- взаимодействие с радиомодемами метрового и гектометрового диапазонов в рамках утвержденных протоколов информационного обмена;
- передачу диагностической информации с ведомого на ведущий локомотив и отображение ее по каждой секции на главном экране в архиве диагностических сообщений и т.д.

**Автоматизированная система управления «Реестр интеллектуальной собственности» (АСУ «РИС») 2.0**

*Авторы: Воронков А. А., Першин Е. В., Полякова Е. А., Ратников А. А., Исаева В. А.*

*Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05 марта 2024 г.*

*Номер регистрации (свидетельства):*

*2024615324.*

*Правообладатель: АО «ВНИИЖТ»*

Программа представляет собой программное обеспечение, применение которого позволяет автоматизировать процесс управления данными в системе, а также осуществлять мониторинг сведений.

В Программе для ЭВМ реализованы следующие функциональности: централизованное хранение всех сведений о РИД, анализ статистических данных в виде графиков и таблиц, автоматизированный контроль за соблюдением сроков ведения переписки, оплаты пошлин и процессов внедрения и использования РИД.

Программа для ЭВМ применяется в области учета возникновения и прекращения интеллектуальных прав.

**Специализированный тренажер обучения машинистов энергосберегающему ведению поезда (СТМЭ)**

*Авторы: Виноградов С. А., Мехедов М. И., Мугинштейн Л. А., Лобанов С. В., Крюков И. П.*

*Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 08 декабря 2023 г.*

*Номер регистрации (свидетельства):*

*2023686850.*

*Правообладатель: АО «ВНИИЖТ»*

Специализированный тренажер предназначен для использования при профессиональной подготовке, самоподготовке и повышении квалификации машинистов для обучения навыкам энергосберегающего управления движением поезда по заданному расписанию. Тренажер состоит из связанных между собой модулей Рабочего Места Инструктора и Рабочего Места Обучаемого Машиниста, реализованных на базе персонального компьютера, с отображением информационно-управляющего поля машиниста средствами трехмерной компьютерной графики с возможностью подключения специализированного пульта управления локомотивом, модуля энергооптимального тягового расчета и модуля регистрации результатов тренажа в базе данных.

*По вопросам приобретения обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ». Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru*

19-я международная выставка



# ЭЛЕКТРОНИКА ТРАНСПОРТ

информационные технологии и электроника для пассажирского  
транспорта и транспортной инфраструктуры



**2026** 09-11 июня  
Москва, ВДНХ

+7 (495) 287-44-12

[info@e-transport.ru](mailto:info@e-transport.ru)

[www.e-transport.ru](http://www.e-transport.ru)

