

Главный редактор Д. П. Кононов, д-р техн. наук, доцент
Editor-in-chief D. Konoнов, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Заместитель главного редактора А. М. Евстафьев, д-р техн. наук, профессор

Deputy chief editor A. Evstafev, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Научный редактор Т. С. Титова, д-р техн. наук, профессор
Scientific Editor T. Titova, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Литературное редактирование и корректура Л. А. Солодовникова
Editing and proofreading L. Solodovnikova

Верстка М. В. Цыбульская
Layout M. Tsybul'skaya

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Издатель

ООО «Медиа-Сервис» по договору № ЭА87426 от 12.01.2026

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Media Service LLC № ЭА87426, 12.01.2026

Контакты

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9,
тел.: (812) 457-85-36, e-mail: brni@pgups.ru;
111024, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Авиамоторная, д. 50, стр. 2, помещ. 29/2

Contacts

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
+7 (812) 457-85-36, e-mail: brni@pgups.ru;
111024, Moscow, inner ter. city municipal district Lefortovo,
Aviamotornaya st., 50 building 2, room 29/2

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ЭЛ № ФС 77-45490 от 22.06.2011 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Mass media registration certificate number

ЭЛ No. ФС 77-45490 dd. 22.06.2011 issued by the The Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

The Journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI)

Журнал имеет институт рецензирования

The Journal has the Peer-review division

Журнал распространяется через интернет без ограничений и по адресно-целевой подписке через редакцию

The Journal is distributed via Internet for free and by subscription via Editorial office

Минимальные системные требования

Тип компьютера, процессор, сопроцессор, частота: Pentium IV и выше; оперативная память (RAM): 256 Мб и выше; необходимо на винчестере: не менее 64 Мб; ОС MacOS, Windows (XP, Vista, 7); видеосистема: встроенная; дополнительное ПО: Adobe Reader версия от 7.X или аналог. Защита от незаконного распространения: реализуется встроенными средствами Adobe Acrobat

Дата выпуска 22.06.2026.

Формат 60×84/16. Уч.-изд. л. 13,31

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

INTERNATIONAL EDITORIAL

Валинский Олег Сергеевич, канд. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Совета
Oleg Valinskiy, PhD in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Хамидов Отабек Рустамович, д-р техн. наук, доцент, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан
Otabek Khamidov, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Tashkent State Technical University, Tashkent, The Republic of Uzbekistan

Ли Вэйли, профессор, Институт электрических машин и приборов, Пекинский университет Цзяотун, Пекин, Китай

Weili Li, PhD Degree and Professor, School of Electrical Engineering, Director of Institute of Electrical Machinery and Appliances, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

Ли Фушэн, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай

Fusheng Li, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

Поляк Милош, профессор, Жилинский университет, Жилин, Словацкая Республика

Milos Poliak, Ing. PhD, Professor, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

Стыскала Витезслав, профессор, Оставский технический университет, Острава, Чешская Республика

Vitezslav Styskala, PhD, Associate Professor, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic

Чжан Чжунъян, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай

Zhongyang Zhang, University Degree, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Professor, Secretary of the School of Locomotives and Rolling Stock, Zhengzhou, China

Бельтюков Владимир Петрович, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Vladimir Beltyukov, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Блажко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Liudmila Blazhko, Dr. Sci. in Engineering Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Бороненко Юрий Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Yuriy Boronenko, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грачев Владимир Васильевич, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Vladimir Grachev, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грищенко Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Alexander Grishchenko, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Дудкин Евгений Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Evgeniy Dudkin, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Евстафьев Андрей Михайлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Andrey Evstafev, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Журавлева Наталья Александровна, д-р экон. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Natalya Zhuravleva, Dr. Sci. in Economics, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Ким Константин Константинович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Konstantin Kim, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Колпачьян Павел Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Pavel Kolpakchyan, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Лapidус Лариса Владимировна, д-р экон. наук, профессор, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Larisa Lapidus, Dr. Sci. in Economics, Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Никитин Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Alexander Nikitin, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Никитин Виктор Валерьевич, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Victor Nikitin, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Пудовиков Олег Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, РУТ, Москва, Россия

Oleg Pudovikov, Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia

Рачек Светлана Витальевна, д-р экон. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия

Svetlana Rachek, Dr. Sci. in Economics, Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Tamila Titova, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Штыков Валерий Иванович, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Valerij Shtykov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДЛАГАЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «БЮЛЛЕТЕНЬ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

1.1. Тема и содержание представляемой для публикации статьи должны соответствовать профилю журнала, обладать научной новизной и представлять интерес для специалистов.

1.2. Статьи, ранее опубликованные или переданные в другие издания, в журнал не принимаются.

1.3. Результаты исследований должны соответствовать одному из научных направлений: «Транспортные системы», «Энергетика и электротехника», «Экономика».

1.4. Нижеперечисленные материалы предоставляются в электронном виде в одном архивном файле (zip или rar):

Файл 1 — рукопись научной статьи в формате MS Word.

Файл 2 — первая страница рукописи, подписанная автором (авторами).

Файл 3 — согласие на обработку персональных данных, заверенное личной подписью, в сканированном виде.

Файл 4 — информация об авторах:

- Ф. И. О. полностью;
- дата рождения;
- место работы, должность;
- ученая степень и звание;
- паспортные данные (серия, номер, кем и когда выдан);
- e-mail, телефон;
- адрес.

Файл 5 — название статьи, аннотация, ключевые слова, библиографический список на английском языке в формате MS Word.

Файл 6 — экспертное заключение о возможности опубликования рукописи в открытом доступе, заверенное по месту обучения или работы, в сканированном виде.

Файл 7 — рецензия научного руководителя (для студентов — исследователей, магистров, аспирантов и соискателей ученых степеней).

Файл 8 — лицензионный договор.

1.5. Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка). В случае отрицательного отзыва рукопись возвращается автору на доработку. В случае повторного отрицательного отзыва статья отклоняется. После получения положительной рецензии с рекомендацией к публикации рукопись передается в издательство и проходит предпечатную подготовку.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

Объем статьи — не менее 8 и не более 15 страниц: при наборе текста в формате Word, кегль 14, интервал одинарный. На первой странице рукописи помещаются УДК, фамилии авторов (с указанием места обучения или работы), название статьи, аннотация и ключевые слова. Текст должен содержать введение, озаглавленные разделы, заключение.

Формулы должны быть набраны шрифтом Times New Roman в тексте статьи или в программе Math Type. Буквы латинского алфавита в тексте и формулах набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов — обычным шрифтом. Нумеровать нужно только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Формат страницы — А4; каждое поле — 2,5 см; абзацный отступ — 1 см; размер шрифта 14, выравнивание по левому краю; автор (авторы) с указанием места обучения или работы — размер шрифта 14, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; название рукописи — размер шрифта 14, строчные буквы, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; аннотация, ключевые слова — размер шрифта 12, выравнивание по ширине.

Требуемый объем **аннотации** — 200–250 слов.

В аннотации должны быть указаны цель, методы, результаты, практическая значимость работы.

Библиографический список приводится в конце статьи и составляется по мере упоминания работ в тексте. Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках.

Рисунки, графики и таблицы должны иметь номер и заголовок (размер шрифта 12, выравнивание по центру). **Внимание!** Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

Фотографии предоставляются в двух вариантах: в тексте статьи и в виде отдельных файлов TIFF и JPEG без сжатия. Название файла должно соответствовать подрисовочной подписи. Сканирование материалов из альбомов, журналов, буклетов, газет и книг влечет за собой сильное понижение качества изображения. Используйте функцию Descreep. Если вы сканируете фото самостоятельно, выставляйте разрешение 300 dpi (большее не имеет смысла, меньшее приведет к понижению качества). То же самое касается рисунков, графиков и диаграмм, созданных в CorelDraw и Illustrator. Помещайте в файл в формате Word рисунки только в качестве preview-версии, не забывая прилагать отдельно исходники.

Важная информация. Настоящие требования могут быть изменены без оповещения авторов. Неисключительные права на все материалы, опубликованные на сайте журнала, кроме оговоренных случаев, принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС. Все материалы, авторские права на которые принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС, могут быть перепечатаны при наличии письменного разрешения ФГБОУ ВО ПГУПС. Требуется предварительное согласие на перепечатку со стороны издателя.

Содержание

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

О. С. Валинский, А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов, Е. В. Суханов	Построение оптимальной модели движения высокоскоростного электропоезда на основе предварительно рассчитанных переходов и динамического программирования	7
Д. Ю. Петров, Ю. П. Бороненко	Проблемы и перспективы совершенствования конструкций и методов испытаний трехосных тележек грузовых вагонов для повышенных осевых нагрузок (на примере промышленного транспорта)	22
С. В. Буриков, Л. В. Цыганская	Теплоизоляционные материалы в конструкции изотермического подвижного состава	43
А. А. Воробьев, А. М. Перепеченов, В. Г. Кондратенко, Н. К. Мигулин	Повышение безопасности движения трамваев за счет применения системы обеспечения активной безопасности и помощи водителю	53
А. В. Агунов, А. В. Щербань, Д. Д. Архипов, А. А. Кузнецов, К. Д. Симоненко	Выявление дуговых процессов в контактной сети городского электротранспорта методами осциллографического мониторинга и спектральной обработки	65
Ли Июань, И. П. Викулов	Электротепловая модель контактной сети переменного тока и механизм плавления гололедных отложений при автотрансформаторной системе тягового электроснабжения	73
В. В. Кудюкин, В. С. Кузьмин	Методика проектирования робототехнических комплексов для расформирования составов на сортировочной горке	86
А. Д. Соловьёв	Волновые процессы в высоковольтной линии автоблокировки 10 кВ при серийных ударах молнии	105
А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская	Оптимизация параметров рессорного подвешивания и оценка показателей динамических качеств моторного вагона высокоскоростного электропоезда	118
Шэнь Цзеи, А. Е. Цаплин	Интеллектуализация технологий динамического мониторинга подвижного состава железных дорог Китая	133
А. А. Кульков, Д. Д. Никонов, Е. Л. Грязнова	Статистический анализ возникновения отказов систем тягового привода электроподвижного состава метрополитена	149
Е. В. Пакулина, А. А. Мигров, А. М. Перепеченов, И. Ю. Новосельский	Сокращение транспортных расходов на доставку рельсовых плетей за счет внедрения промежуточных складов	161

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А. А. Блюдов, Г. Ю. Пронин	Алгоритм вычисления минимальных кодовых расстояний CRC как блочного кода	176
Б. А. Соловьев, Г. К. Гамисония, А. Д. Аюпов, Р. Т. Хазиева	Система автоматического управления энергопотреблением подогреваемого тротуара на основе резистивного кабеля	187
Е. Л. Рыжова	Интеллектуальные системы учета потерь тепловой энергии	206

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Т. П. Сацук, А. Ю. Афанасьева	Трансформация ценностных установок российского аудиторского рынка: текущее состояние и перспективы развития	217
С. И. Миронов, С. Г. Опарин	Анализ современного состояния и перспектив развития конкуренции в сфере закупок в контексте концепции технологического развития России	229

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

O. S. Valinskiy, A. M. Evstaf'ev, A. N. Sychugov, E. V. Sukhanov	Construction of an Optimal Motion Model for a High-Speed Electric Train Based on Precomputed Transitions and Dynamic Programming	7
D. Yu. Petrov, Yu. P. Boronenko	Problems and Prospects of Improving the Design and Testing Methods of Three-Axle Trolleys for Freight Cars with Increased Axial Loads (Based on Industrial Transport)	22
S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya	Thermal Insulation Materials in the Design of Isothermal Rolling Stock	43
A. A. Vorob'ev, A. M. Perepechenov, V. G. Kondratenko, N. K. Migulin	Improving Tram Safety Through the Use of Active Safety and Driver Assistance Systems	53
A. V. Agunov, A. V. Shcherban', D. D. Arkhipov, A. A. Kuznetsov, K. D. Simonenko	Identification of Arc Processes in the Contact Network of Urban Electric Transport by Methods of Oscillographic Monitoring and Spectral Processing	65
Yiyuan Li, I. P. Vikulov	Electrothermal Model of an AC Catenary and Mechanisms of Ice Melting under an Autotransformer Traction Power Supply System	73
V. V. Kudyukin, V. S. Kuz'min	Methodology for Designing Robotic Systems for Parallel Train Break-Up on Automated Humps	86
A. D. Solov'yov	Wave Processes in a 10 kV High-Voltage Railway Signalling Line Subjected to Serial Lightning Strikes	105
A. N. Savos'kin, N. S. Lavlinskaya	Optimization of Spring Suspension Parameters and Evaluation of Dynamic Performance of a High-Speed Electric Train Car	118
Jieyi Shen, A. E. Tsaplin	Intellectualization of Dynamic Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock in China	133
A. A. Kul'kov, D. D. Nikonov, E. L. Gryaznova	Statistical Analysis of Failures in the Traction Drive Systems of the Moscow Metro Electric Rolling Stock	149
E. V. Pakulina, A. A. Migrov, A. M. Perepechenov, I. Yu. Novosel'sky	Reduction of Transportation Costs for Delivering of Welded Rail Segments by Intermediate Storages	161

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

A. A. Blyudov, G. Y. Pronin	Algorithm for Computing Minimum Code Distances of CRC as a Block Code	176
B. A. Solov'yov, G. K. Gamisonia, A. D. Ayupov, R. T. Khazieva	Automatic Energy Consumption Control System for Heated Sidewalks Based on Resistive Cables	187
E. L. Ryzhova	Intelligent Thermal Energy Loss Accounting Systems	206

GOVERNANCE AND ECONOMICS

T. P. Satsuk, A. Yu. Afanas'eva	Transformation of Value Attitudes in the Russian Audit Market: Current State and Development Prospects	217
S. I. Mironov, S. G. Oparin	Analysis of the Current State and Prospects for the Development of Competition in the Field of Procurement in the Context of the Concept of Technological Development of Russia	229

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДЛАГАЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «БЮЛЛЕТЕНЬ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

1.1. Тема и содержание представляемой для публикации статьи должны соответствовать профилю журнала, обладать научной новизной и представлять интерес для специалистов.

1.2. Статьи, ранее опубликованные или переданные в другие издания, в журнал не принимаются.

1.3. Результаты исследований должны соответствовать одному из научных направлений: «Транспортные системы», «Энергетика и электротехника», «Экономика».

1.4. Нижеперечисленные материалы предоставляются в электронном виде в одном архивном файле (zip или rar):

Файл 1 — рукопись научной статьи в формате MS Word.

Файл 2 — первая страница рукописи, подписанная автором (авторами).

Файл 3 — согласие на обработку персональных данных, заверенное личной подписью, в сканированном виде.

Файл 4 — информация об авторах:

- Ф. И. О. полностью;
- дата рождения;
- место работы, должность;
- ученая степень и звание;
- паспортные данные (серия, номер, кем и когда выдан);
- e-mail, телефон;
- адрес.

Файл 5 — название статьи, аннотация, ключевые слова, библиографический список на английском языке в формате MS Word.

Файл 6 — экспертное заключение о возможности опубликования рукописи в открытом доступе, заверенное по месту обучения или работы, в сканированном виде.

Файл 7 — рецензия научного руководителя (для студентов — исследователей, магистров, аспирантов и соискателей ученых степеней).

Файл 8 — лицензионный договор.

1.5. Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка). В случае отрицательного отзыва рукопись возвращается автору на доработку. В случае повторного отрицательного отзыва статья отклоняется. После получения положительной рецензии с рекомендацией к публикации рукопись передается в издательство и проходит предпечатную подготовку.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

Объем статьи — не менее 8 и не более 15 страниц: при наборе текста в формате Word, кегль 14, интервал одинарный. На первой странице рукописи помещаются УДК, фамилии авторов (с указанием места обучения или работы), название статьи, аннотация и ключевые слова. Текст должен содержать введение, озаглавленные разделы, заключение.

Формулы должны быть набраны шрифтом Times New Roman в тексте статьи или в программе Math Type. Буквы латинского алфавита в тексте и формулах набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов — обычным шрифтом. Нумеровать нужно только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Формат страницы — А4; каждое поле — 2,5 см; абзацный отступ — 1 см; размер шрифта 14, выравнивание по левому краю; автор (авторы) с указанием места обучения или работы — размер шрифта 14, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; название рукописи — размер шрифта 14, строчные буквы, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; аннотация, ключевые слова — размер шрифта 12, выравнивание по ширине.

Требуемый объем **аннотации** — 200–250 слов.

В аннотации должны быть указаны цель, методы, результаты, практическая значимость работы.

Библиографический список приводится в конце статьи и составляется по мере упоминания работ в тексте. Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках.

Рисунки, графики и таблицы должны иметь номер и заголовок (размер шрифта 12, выравнивание по центру). **Внимание!** Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

Фотографии предоставляются в двух вариантах: в тексте статьи и в виде отдельных файлов TIFF и JPEG без сжатия. Название файла должно соответствовать подрисовочной подписи. Сканирование материалов из альбомов, журналов, буклетов, газет и книг влечет за собой сильное понижение качества изображения. Используйте функцию Descreep. Если вы сканируете фото самостоятельно, выставляйте разрешение 300 dpi (большее не имеет смысла, меньшее приведет к понижению качества). То же самое касается рисунков, графиков и диаграмм, созданных в CorelDraw и Illustrator. Помещайте в файл в формате Word рисунки только в качестве preview-версии, не забывая прилагать отдельно исходники.

Важная информация. Настоящие требования могут быть изменены без оповещения авторов. Неисключительные права на все материалы, опубликованные на сайте журнала, кроме оговоренных случаев, принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС. Все материалы, авторские права на которые принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС, могут быть перепечатаны при наличии письменного разрешения ФГБОУ ВО ПГУПС. Требуется предварительное согласие на перепечатку со стороны издателя.

Содержание

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

О. С. Валинский, А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов, Е. В. Суханов	Построение оптимальной модели движения высокоскоростного электропоезда на основе предварительно рассчитанных переходов и динамического программирования	7
Д. Ю. Петров, Ю. П. Бороненко	Проблемы и перспективы совершенствования конструкций и методов испытаний трехосных тележек грузовых вагонов для повышенных осевых нагрузок (на примере промышленного транспорта)	22
С. В. Буриков, Л. В. Цыганская	Теплоизоляционные материалы в конструкции изотермического подвижного состава	43
А. А. Воробьев, А. М. Перепеченов, В. Г. Кондратенко, Н. К. Мигулин	Повышение безопасности движения трамваев за счет применения системы обеспечения активной безопасности и помощи водителю	53
А. В. Агунов, А. В. Щербань, Д. Д. Архипов, А. А. Кузнецов, К. Д. Симоненко	Выявление дуговых процессов в контактной сети городского электротранспорта методами осциллографического мониторинга и спектральной обработки	65
Ли Июань, И. П. Викулов	Электротепловая модель контактной сети переменного тока и механизм плавления гололедных отложений при автотрансформаторной системе тягового электроснабжения	73
В. В. Кудюкин, В. С. Кузьмин	Методика проектирования робототехнических комплексов для расформирования составов на сортировочной горке	86
А. Д. Соловьёв	Волновые процессы в высоковольтной линии автоблокировки 10 кВ при серийных ударах молнии	105
А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская	Оптимизация параметров рессорного подвешивания и оценка показателей динамических качеств моторного вагона высокоскоростного электропоезда	118
Шэнь Цзеи, А. Е. Цаплин	Интеллектуализация технологий динамического мониторинга подвижного состава железных дорог Китая	133
А. А. Кульков, Д. Д. Никонов, Е. Л. Грязнова	Статистический анализ возникновения отказов систем тягового привода электроподвижного состава метрополитена	149
Е. В. Пакулина, А. А. Мигров, А. М. Перепеченов, И. Ю. Новосельский	Сокращение транспортных расходов на доставку рельсовых плетей за счет внедрения промежуточных складов	161

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А. А. Блюдов, Г. Ю. Пронин	Алгоритм вычисления минимальных кодовых расстояний CRC как блочного кода	176
Б. А. Соловьев, Г. К. Гамисония, А. Д. Аюпов, Р. Т. Хазиева	Система автоматического управления энергопотреблением подогреваемого тротуара на основе резистивного кабеля	187
Е. Л. Рыжова	Интеллектуальные системы учета потерь тепловой энергии	206

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Т. П. Сацук, А. Ю. Афанасьева	Трансформация ценностных установок российского аудиторского рынка: текущее состояние и перспективы развития	217
С. И. Миронов, С. Г. Опарин	Анализ современного состояния и перспектив развития конкуренции в сфере закупок в контексте концепции технологического развития России	229

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

O. S. Valinskiy, A. M. Evstaf'ev, A. N. Sychugov, E. V. Sukhanov	Construction of an Optimal Motion Model for a High-Speed Electric Train Based on Precomputed Transitions and Dynamic Programming	7
D. Yu. Petrov, Yu. P. Boronenko	Problems and Prospects of Improving the Design and Testing Methods of Three-Axle Trolleys for Freight Cars with Increased Axial Loads (Based on Industrial Transport)	22
S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya	Thermal Insulation Materials in the Design of Isothermal Rolling Stock	43
A. A. Vorob'ev, A. M. Perepechenov, V. G. Kondratenko, N. K. Migulin	Improving Tram Safety Through the Use of Active Safety and Driver Assistance Systems	53
A. V. Agunov, A. V. Shcherban', D. D. Arkhipov, A. A. Kuznetsov, K. D. Simonenko	Identification of Arc Processes in the Contact Network of Urban Electric Transport by Methods of Oscillographic Monitoring and Spectral Processing	65
Yiyuan Li, I. P. Vikulov	Electrothermal Model of an AC Catenary and Mechanisms of Ice Melting under an Autotransformer Traction Power Supply System	73
V. V. Kudyukin, V. S. Kuz'min	Methodology for Designing Robotic Systems for Parallel Train Break-Up on Automated Humps	86
A. D. Solov'yov	Wave Processes in a 10 kV High-Voltage Railway Signalling Line Subjected to Serial Lightning Strikes	105
A. N. Savos'kin, N. S. Lavlinskaya	Optimization of Spring Suspension Parameters and Evaluation of Dynamic Performance of a High-Speed Electric Train Car	118
Jieyi Shen, A. E. Tsaplin	Intellectualization of Dynamic Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock in China	133
A. A. Kul'kov, D. D. Nikonov, E. L. Gryaznova	Statistical Analysis of Failures in the Traction Drive Systems of the Moscow Metro Electric Rolling Stock	149
E. V. Pakulina, A. A. Migrov, A. M. Perepechenov, I. Yu. Novosel'sky	Reduction of Transportation Costs for Delivering of Welded Rail Segments by Intermediate Storages	161

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

A. A. Blyudov, G. Y. Pronin	Algorithm for Computing Minimum Code Distances of CRC as a Block Code	176
B. A. Solov'yov, G. K. Gamisonia, A. D. Ayupov, R. T. Khazieva	Automatic Energy Consumption Control System for Heated Sidewalks Based on Resistive Cables	187
E. L. Ryzhova	Intelligent Thermal Energy Loss Accounting Systems	206

GOVERNANCE AND ECONOMICS

T. P. Satsuk, A. Yu. Afanas'eva	Transformation of Value Attitudes in the Russian Audit Market: Current State and Development Prospects	217
S. I. Mironov, S. G. Oparin	Analysis of the Current State and Prospects for the Develop- ment of Competition in the Field of Procurement in the Context of the Concept of Technological Development of Russia	229

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.4.053

Построение оптимальной модели движения высокоскоростного электропоезда на основе предварительно рассчитанных переходов и динамического программирования

О. С. Валинский, А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов, Е. В. Суханов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Валинский О. С., Евстафьев А. М., Сычугов А. Н., Суханов Е. В. Построение оптимальной модели движения высокоскоростного электропоезда на основе предварительно рассчитанных переходов и динамического программирования // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 7–21. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-7-21

Аннотация

Цель: построение оптимальной модели движения высокоскоростного электропоезда по заданному пути следования, обеспечивающей согласованное соблюдение графика движения, ограничений скорости и остановочных условий на основе разработанной модели автоведения, предварительного расчета переходных характеристик движения и рекуррентной процедуры динамического программирования. **Методы:** использованы разработанная модель автоведения электропоезда, сегментное представление пути следования, предварительный расчет переходных характеристик движения и метод динамического программирования. Предлагаемый подход позволяет отделить этап предварительного формирования переходных характеристик движения от этапа оптимизационного выбора решений. Для каждого сегмента пути и набора допустимых входных состояний предварительно определяются результаты прохождения участка в виде времени хода и скорости на выходе, после чего выполняется поэтапный выбор управляющих ограничений скорости по рекуррентному соотношению Беллмана. **Результаты:** сформирован алгоритм построения оптимальной модели движения высокоскоростного электропоезда, обеспечивающий согласованное соблюдение графика движения при сохранении исполнительной модели автоведения в качестве вычислительной основы. Показано, что использование предварительно рассчитанных переходов позволяет связать сложную модель продольного движения с процедурой оптимизационного выбора решений и получить расчетную модель, пригодную для дальнейшего применения в составе алгоритмов автоведения. Представлены результаты моделирования, подтверждающие незначительное расхождение между расчетом, полученным методом динамического программирования, и прямым моделированием движения на модели автоведения. **Практическая значимость:** предложенный подход может быть использован при построении алгоритмов автоведения высокоскоростных электропоездов, ориентированных на соблюдение графика движения, повышение устойчивости управления движением и формирование обоснованной модели движения поезда по заданному пути следования.

Ключевые слова: высокоскоростной электропоезд, график движения, система автоведения, динамическое программирование, соотношение Беллмана, ограничение скорости, оптимизация движения

Введение

В современных условиях эксплуатации высокоскоростного железнодорожного транспорта особое значение приобретает точное соблюдение графика при безусловном выполнении инфраструктурных ограничений. По мере роста интенсивности движения и ужесточения требований к выполнению заданного объема перевозочного процесса задачи расчета рациональных режимов ведения поезда требуют применения более совершенных вычислительных средств. В связи с этим системы автоведения представляют интерес не только как средство автоматизации управления поездом, но и как инструмент построения обоснованной модели движения по заданному пути следования.

В рамках выполненного исследования используется разработанная система автоматического ведения высокоскоростного электропоезда, позволяющая численно воспроизводить продольное движение с учетом профиля пути, инфраструктурных ограничений скорости и исполнительской логики режимов движения. Указанная система рассматривается как вычислительное ядро дополнительного алгоритма оптимизации, в котором управление движением осуществляется посредством введения дополнительных ограничений скорости по пути следования. При этом их исполнение в виде согласованной последовательности режимов движения и соответствующих тяговых и тормозных усилий обеспечивается самой моделью автоведения [1–4].

В поставленной задаче требуется определить, по какой логике должны изменяться дополнительные ограничения скорости на отдельных участках пути, чтобы обеспечить требуемое время прохождения контрольных точек графика и остановочных пунктов. Использование классической непрерывной постановки для такой задачи затруднительно, поскольку ограничения скорости и остановочные условия задаются по координате пути, тогда как требования графика формулируются по времени. Кроме того, применение непрерывной расчетной схемы потребовало бы существенного упрощения логики движения электропоезда.

В статье рассматривается построение оптимальной модели движения высокоскоростного электропоезда на основе сегментного представления пути, предварительного расчета переходных характеристик движения и рекуррентной процедуры динамического программирования [5–7].

Постановка задачи оптимальной модели движения

Пусть движение поезда рассматривается в координате пути s , тогда данные задачи задаются зависимостями ограничения скорости $v_{lim}(s)$, множеством остановочных пунктов S_{stop} и набором контрольных точек графика (s_j, t_j^{target}) , включая промежуточные пункты, где s_j — координата контрольной точки, t_j^{target} — требуемое время ее прохождения.

В отличие от классического прямого моделирования движения электропоезда данная работа направлена на определение последовательности дополнительных

ограничений скорости по пути следования, которая обеспечивает точное выполнение графика движения при обязательном соблюдении инфраструктурных ограничений.

Введем формулу для учета отклонения по времени ε_j от графика движения в контрольных точках с учетом фактического времени прохождения t_j :

$$\varepsilon_j = t_j - t_j^{target}.$$

Тогда задача может быть сформулирована как выбор определенной последовательности дополнительных ограничений скорости, при которой минимизируется суммарное отклонение от графика на контрольных точках при соблюдении всех обязательных ограничений. В общем виде целевая функция J может быть записана в виде суммарного критерия качества исполнения графика движения:

$$J = \sum_{j=1}^N \Psi_j(\varepsilon_j),$$

где $\Psi_j(\varepsilon_j)$ — штрафная функция отклонения от графика;
 N — число точек.

Такое представление позволяет учитывать разную значимость отдельных узлов графика. Для остановочных пунктов могут использоваться жесткие штрафные функции, а для промежуточных точек — более мягкие.

Поскольку ограничения скорости и станции заданы по координате пути, а требования графика — по времени, задача имеет смешанный координатно-временной характер. При этом модель автоведения воспроизводит реальную исполнительную логику движения электропоезда, включая непрерывное изменение тяговых и тормозных усилий. Вследствие этого прямое решение задачи в непрерывной постановке потребовало бы существенного упрощения исходной модели, а полный перебор всех возможных вариантов движения на всем участке пути оказался бы вычислительно нецелесообразным. Поэтому для решения поставленной задачи используется дискретная сегментная схема расчета, в рамках которой задача сводится к выбору последовательности дополнительных ограничений скорости, обеспечивающей минимальное отклонение от графика движения при соблюдении инфраструктурных ограничений и остановочных условий.

Сегментное представление пути и предварительный расчет переходных характеристик движения

Для решения поставленной задачи путь следования представляется в виде последовательности интервалов между остановками. Внутри каждого интервала формируется система узлов, включающая контрольные точки графика и границы расчетных сегментов.

Пусть для рассматриваемого интервала заданы узлы:

$$s_1 < s_2 < \dots < s_M,$$

где s_1 соответствует началу интервала, s_M — его окончанию, а промежуточные значения соответствуют внутренним контрольным точкам.

Соответственно, рассматриваемый интервал разбивается на последовательность сегментов:

$$[s_1, s_2], [s_2, s_3], \dots, [s_{M-1}, s_M],$$

где M — число узлов интервала;

$(M - 1)$ — число сегментов интервала.

Для каждого сегмента заранее определяются результаты прохождения при разных входных скоростях и вариантах ограничения скорости [8–10].

Для построения алгоритма динамического программирования вводятся дискретные множества состояний и дополнительных ограничений скорости. В качестве состояния на входе сегмента используется скорость поезда в левом узле сегмента. Формируется дискретная сетка скоростей:

$$V = \{v^1, v^2, \dots, v^n\},$$

где V — множество допустимых входных скоростей;

n — число значений скорости сетки.

В качестве переменной управления на сегменте используется дополнительное верхнее ограничение скорости, задаваемое поверх исходного инфраструктурного ограничения. Для этого вводится дискретная сетка допустимых значений:

$$U = \{u^1, u^2, \dots, u^m\},$$

где U — множество допустимых дополнительных ограничений скорости;

m — число допустимых значений ограничения скорости на сегменте.

Исполнение выбранного на сегменте ограничения скорости в виде согласованной последовательности режимов движения и соответствующих тяговых и тормозных усилий обеспечивается моделью автоведения.

Ключевым элементом предлагаемого подхода является предварительный расчет переходных характеристик движения. Для каждого сегмента, каждого значения входной скорости и каждого допустимого дополнительного ограничения скорости заранее определяется результат прохождения сегмента с помощью моделирования системы автоведения.

Переходная характеристика сегмента Φ_k задает отображение входной скорости v_k и выбранного дополнительного ограничения скорости u_k в выходную скорость v_{k+1} и время прохождения сегмента Δt_k :

$$\Phi_k(v_k, u_k) = (v_{k+1}, \Delta t_k).$$

Для каждого сегмента выходные значения предварительно определяются на дискретной сетке пар входов, что и образует таблицу переходов сегмента. Тем самым для каждого сегмента формируется дискретное множество Y_k допустимых переходов:

$$Y_k = \{\Phi_k(v_k, u_k) \mid v_k \in V, u_k \in U\}.$$

Каждый элемент таблицы является результатом прямого численного расчета, а не упрощенной непрерывной аппроксимации. Это позволяет сохранить связь алгоритма оптимизации с расчетной моделью движения электропоезда.

Поскольку при оптимизации требуется обеспечить выполнение графика движения, то для расчета накопленной ошибки по времени и формирования рекуррентной процедуры динамического программирования с каждым сегментом сопоставляется целевое время прохождения, определяемое по времени соседних узлов графика. Если левый и правый узлы сегмента имеют целевые значения времени t_k^{target} и t_{k+1}^{target} , то целевое время прохождения сегмента Δt_k^{target} определяется как:

$$\Delta t_k^{target} = t_{k+1}^{target} - t_k^{target}.$$

Предварительный расчет переходных характеристик позволяет на этапе оптимизационного расчета не выполнять повторное моделирование движения поезда для каждой проверяемой комбинации входной скорости и дополнительного ее ограничения. Вместо этого рекуррентная процедура опирается на заранее сформированные таблицы переходов сегментов, в которых уже содержатся значения времени прохождения и выходной скорости. За счет этого уменьшается объем вычислений при выборе решений без потери связи с моделью автоведения.

Рекуррентный расчет по соотношению Беллмана для выбора оптимальной модели движения

После построения сегментного представления пути следования и предварительного расчета переходных характеристик дальнейший расчет сводится к выбору дополнительных ограничений скорости на последовательности сегментов. Такой выбор выполняется рекуррентной процедурой динамического программирования, в которой на каждом шаге учитываются текущая скорость поезда и накопленное отклонение от графика движения.

Учет только скорости в данной задаче недостаточен, поскольку поезд может входить в сегмент с уже накопленным опережением или отставанием относительно значения времени по расписанию. Поэтому в вектор состояния, помимо скорости, включается накопленная ошибка по времени.

Тогда вектор состояния x_k на входе в k -й сегмент представим в виде:

$$x_k = (v_k, \varepsilon_k),$$

где v_k — скорость поезда в левом узле k -го сегмента;

ε_k — накопленная ошибка по времени к моменту входа в k -й сегмент, характеризующая текущее отклонение расчетного движения от графика.

Для обеспечения дискретного расчета введем сетку E допустимых значений накопленной ошибки по времени:

$$E = \{\varepsilon^1, \varepsilon^2, \dots, \varepsilon^q\},$$

где q — число значений ошибки временной сетки.

Таким образом, полное дискретное состояние задачи определяется комбинацией скорости и накопленной ошибки по времени.

Пусть на k -м сегменте из состояния x_k выбирается управляющее воздействие u_k . Тогда по предварительно рассчитанной переходной характеристике определяются скорость на выходе из сегмента v_{k+1} и фактическое время его прохождения Δt_k :

$$\Phi_k(v_k, u_k) = (v_{k+1}, \Delta t_k).$$

Поскольку для сегмента известно также целевое время прохождения Δt_k^{target} , накопленная ошибка по времени на правой границе сегмента определяется рекуррентным выражением:

$$\varepsilon_{k+1} = \varepsilon_k + \Delta t_k - \Delta t_k^{target},$$

где ε_{k+1} — накопленная ошибка по времени на выходе из k -го сегмента;

ε_k — накопленная ошибка по времени на входе в сегмент.

Следовательно, переход состояния модели может быть записан в виде:

$$x_{k+1} = (v_{k+1}, \varepsilon_k + \Delta t_k - \Delta t_k^{target}).$$

Таким образом, выбор управляющего воздействия на каждом сегменте влияет не только на выходную скорость поезда, но и на дальнейшее накопление ошибки по времени, а значит, на возможность соблюдения графика на последующих участках пути.

Для выбора оптимальной последовательности управляющих воздействий необходимо задать функцию локальной оценки, характеризующую качество

перехода на очередном сегменте. В рассматриваемой задаче такая оценка связывается прежде всего с отклонением от графика на правой границе сегмента.

Обозначим локальную функцию оценки через L_k . В поставленной задаче локальная оценка формируется через штраф за отклонение от требуемого времени в правом узле сегмента. Поэтому удобно записать так:

$$L_k(v_k, \varepsilon_k, u_k) = \Psi_k(\varepsilon_{k+1}),$$

где $\Psi_k(\varepsilon_{k+1})$ — штрафная функция отклонения от графика на правой границе k -го сегмента.

В зависимости от назначения узла штрафная функция может задаваться разными способами. Для конечных узлов интервалов, соответствующих остановочным пунктам или другим приоритетным точкам графика, штраф за отклонение от целевого времени задается более жестко, тогда как для промежуточных контрольных точек могут использоваться более мягкие параметры штрафования. Это позволяет избежать избыточно жесткой локальной подстройки каждой внутренней точки модели и одновременно сохранить требуемую точность движения в наиболее значимых узлах.

Пусть $J_k(v_k, \varepsilon_k)$ — это минимальное значение суммарной оценки движения на отрезке от k -го сегмента до конца рассматриваемого интервала, при условии что на входе в k -й сегмент поезд имеет скорость v_k и накопленную ошибку по времени ε_k .

Применим рекуррентное соотношение Беллмана:

$$J_k(v_k, \varepsilon_k) = \min_{u_k \in U_k(v_k)} [L_k(v_k, \varepsilon_k, u_k) + J_{k+1}(v_{k+1}, \varepsilon_{k+1})],$$

где $J_k(v_k, \varepsilon_k)$ — минимальная суммарная оценка на остатке пути начиная с k -го сегмента;

$U_k(v_k)$ — множество допустимых управляющих воздействий на k -м сегменте при входной скорости v_k ;

$L_k(v_k, \varepsilon_k, u_k)$ — локальная оценка выбранного перехода;

$J_{k+1}(v_{k+1}, \varepsilon_{k+1})$ — минимальная суммарная оценка на последующих сегментах.

При этом значения v_{k+1} и ε_{k+1} определяются по переходной характеристике сегмента и формуле накопления ошибки по времени.

Граничное условие на последнем сегменте задается через конечную штрафную функцию, отражающую требования к соблюдению времени прибытия в конечную точку интервала:

$$J_M(v_M, \varepsilon_M) = \Psi_M(\varepsilon_M).$$

Если в конечной точке интервала требуется полная остановка, то дополнительно вводится ограничение на допустимое конечное состояние по скорости. В этом случае переходы, не обеспечивающие выполнение остановочного условия, исключаются из множества допустимых.

Рекуррентный расчет по соотношению Беллмана реализуется обратным проходом от конечного узла интервала к начальному [5]. На каждом сегменте и для каждого допустимого состояния (v_k, ε_k) определяется такое управляющее воздействие u_k^{opt} , при котором значение функции J_k становится минимальным.

В результате выполнения обратного расчета для каждого состояния сохраняется значение минимальной суммарной оценки и управляющее воздействие, обеспечивающее этот минимум. После завершения обратного расчета выполняется прямое восстановление оптимальной последовательности дополнительных ограничений скорости начиная от заданного начального состояния поезда.

Если обозначить найденную оптимальную последовательность управляющих воздействий как:

$$U^{opt} = (u_1^{opt}, u_2^{opt}, \dots, u_{M-1}^{opt}),$$

то именно эта последовательность определяет оптимальную модель движения поезда на рассматриваемом интервале. Далее она используется для построения итогового ограничения скорости по пути следования и последующей проверки путем прямого моделирования движения.

Применение динамического программирования в данной задаче обусловлено тем, что оно позволяет естественным образом связать дискретный выбор дополнительных ограничений скорости на отдельных сегментах с накоплением ошибки по времени на всем пути следования [6, 7, 10]. В отличие от полного перебора всех управляющих воздействий рекуррентное соотношение Беллмана позволяет учитывать влияние текущего решения на последующие сегменты без повторного рассмотрения одинаковых состояний [5, 6].

Таким образом, основное преимущество предлагаемого подхода состоит в том, что задача построения оптимальной модели движения по графику решается на основе модели автоведения, но без необходимости многократного прямого моделирования для всех возможных глобальных комбинаций дополнительных ограничений скорости.

Результаты моделирования и их анализ

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма и сопоставления полученных результатов было выполнено моделирование движения высокоскоростного электропоезда «Сапсан» по заданному пути следования и действующим ограничениям скорости в двух вариантах.

В первом использовалась исходная модель движения без введения дополнительных оптимальных ограничений скорости. Во втором движение рассчитывалось с использованием ограничений скорости, сформированных по результатам рекуррентной процедуры динамического программирования.

Модель движения поезда, полученная без использования оптимальных ограничений скорости для соблюдения графика движения, представлена на рис. 1.

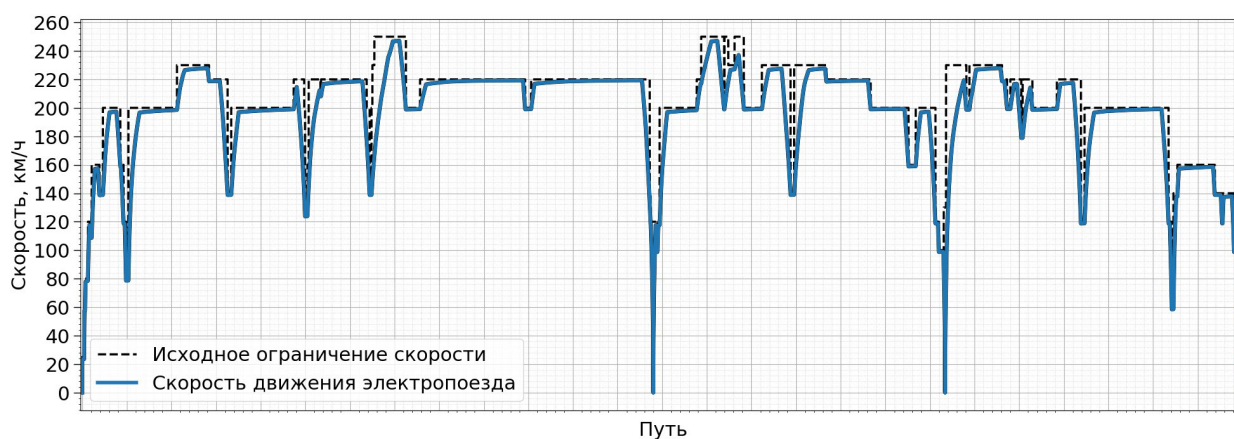


Рис. 1. Модель движения высокоскоростного электропоезда без использования оптимальных ограничений скорости

Представленная выше модель описывает движение с максимально разрешенной скоростью для прохождения всего пути следования за минимально возможное время. Такое движение плохо согласуется с установленным графиком прибытия на станцию.

В результате динамического программирования были получены оптимальные ограничения скорости, которые позволяют согласовать движение электропоезда с заданным графиком движения. Построенный алгоритм не нарушает исходные обязательные ограничения, а формирует дополнительное управляемое снижение допустимой скорости на тех сегментах, где это требуется для согласованного соблюдения графика движения. Сопоставление исходных и оптимальных ограничений скорости представлено на рис. 2.

Модель движения электропоезда, построенная с учетом новых оптимальных ограничений скорости, представлена на рис. 3.

Для количественной оценки результата на рис. 4 показана динамика погрешности во времени хода по всем пунктам для модели после алгоритма оптимизации движения. Динамика модели без алгоритмов оптимизации не приводится, потому что ошибка во времени прибытия на станции для такого движения стабильно возрастает на каждом шаге.

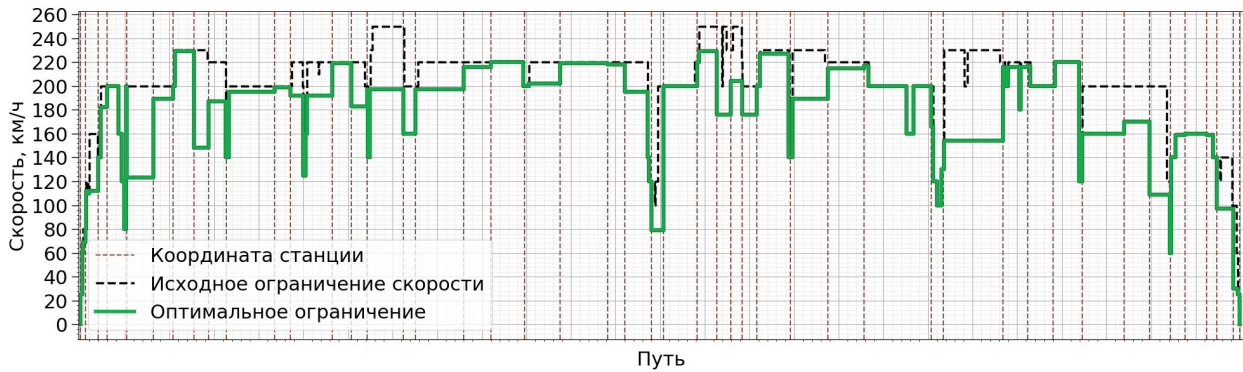


Рис. 2. Исходные и оптимальные ограничения скорости по пути следования

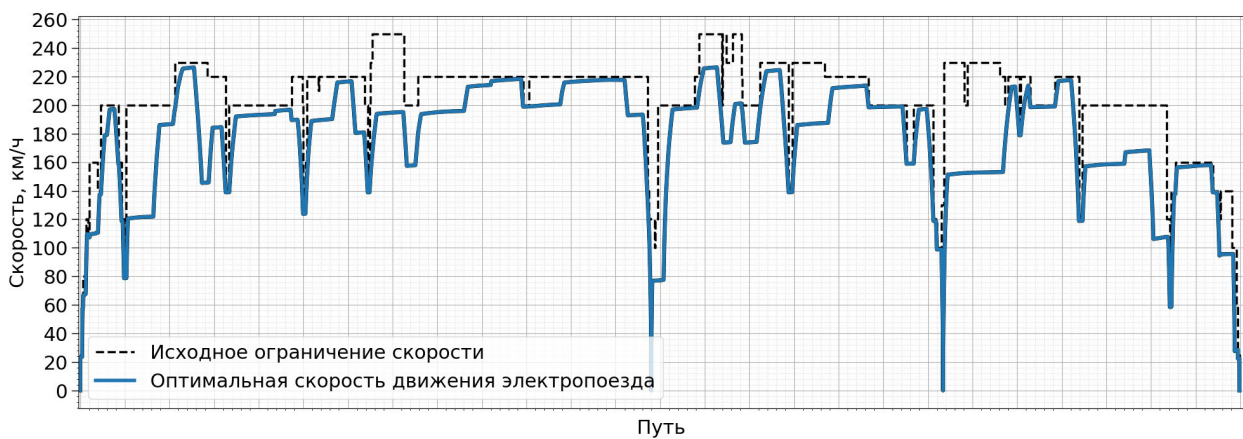


Рис. 3. Модель движения высокоскоростного электропоезда при использовании оптимальных ограничений скорости

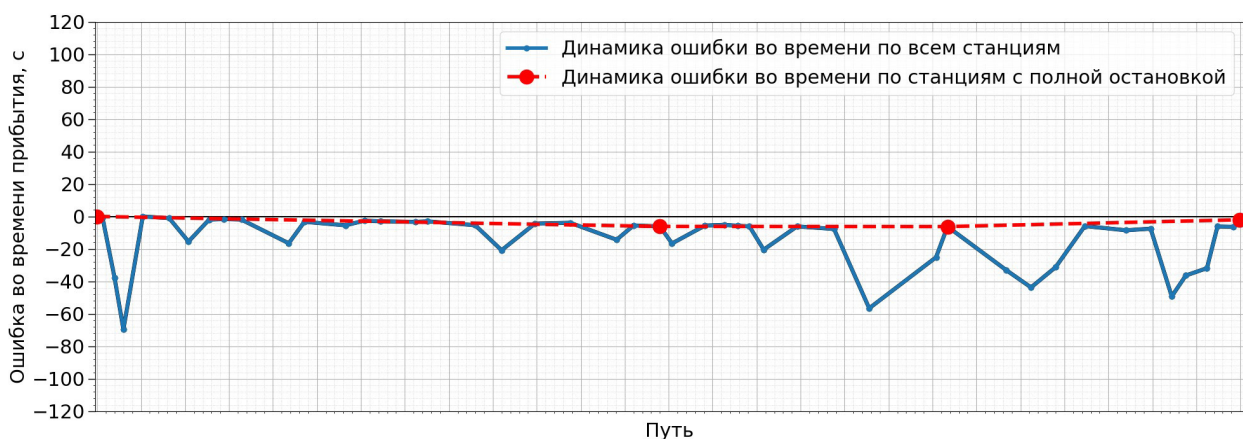


Рис. 4. Динамика погрешности во времени хода для модели, рассчитанной по оптимальным ограничениям скорости

Полученные зависимости показывают, что использование сформированных дополнительных ограничений скорости позволяет обеспечить точное прохождение контрольных точек и остановочных станций в соответствии с установленным

графиком движения при сохранении лишь незначительного опережения на отдельных станциях.

Дополнительно на рис. 5 представлено сопоставление динамики погрешности во времени хода, полученной по рекуррентной процедуре динамического программирования, и соответствующей динамики, рассчитанной путем прямого моделирования движения с использованием модели автоведения.

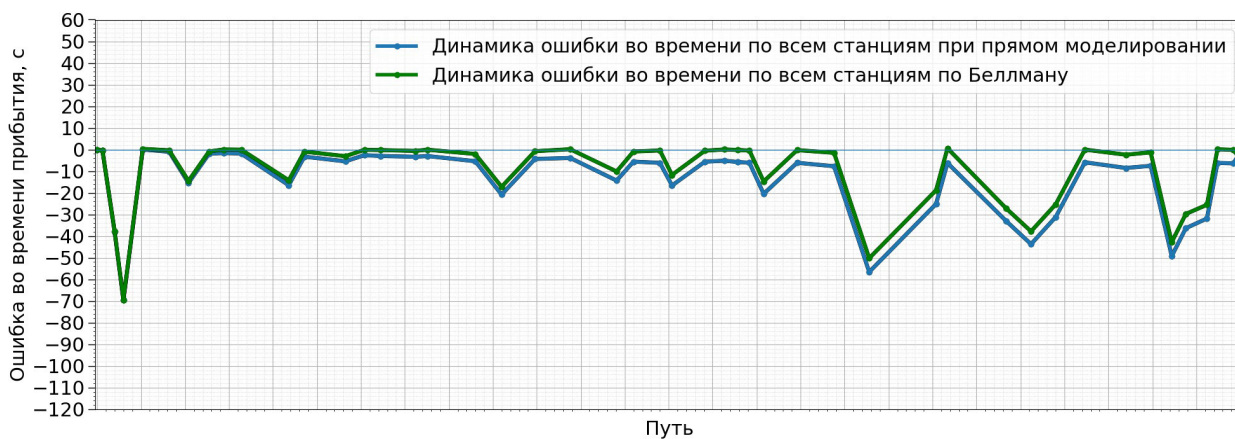


Рис. 5. Сопоставление динамики погрешности во времени хода, полученной по рекуррентной процедуре динамического программирования и по прямому моделированию движения на модели автоведения

Значительная степень схожести этих зависимостей показывает, что предварительно рассчитанные переходные характеристики и рекуррентное соотношение Беллмана обеспечивают адекватное описание движения поезда на уровне, достаточном для дальнейшего прямого моделирования. Иными словами, построенная оптимальная модель движения не только формально решает задачу выбора ограничений скорости, но и сохраняет согласованность с полной моделью автоведения.

В целом результаты моделирования подтверждают хорошую работоспособность предложенного подхода. Показано, что введение дополнительных ограничений скорости, сформированных по рекуррентной процедуре динамического программирования, позволяет управляемо изменять модель движения электропоезда и добиваться более точного соблюдения графика движения. При этом сравнение расчетных и моделируемых зависимостей демонстрирует, что предложенная схема сохраняет согласованность между этапом оптимизационного выбора ограничений скорости и этапом прямого моделирования движения поезда.

Заключение

В статье рассмотрена задача построения оптимальной модели движения высокоскоростного электропоезда по заданному пути следования с учетом графика движения, ограничений скорости и остановочных условий. Показано, что для ее

решения целесообразно использовать двухуровневую расчетную схему, в которой модель автоведения применяется в качестве вычислительного ядра, а выбор последовательности дополнительных ограничений скорости по участку пути осуществляется на основе предварительно рассчитанных переходных характеристик и рекуррентной процедуры динамического программирования, что значительно уменьшает трудоемкость процедуры выбора решений.

Предложенный подход позволяет перейти от прямого численного моделирования движения поезда при заранее заданной логике управления к построению оптимальной модели движения, ориентированной на согласованное соблюдение графика.

Результаты моделирования подтвердили хорошую работоспособность предложенной расчетной схемы. Использование предварительно рассчитанных переходов позволяет связать модель продольного движения электропоезда с процедурой поэтапного выбора решений без необходимости полного перебора всех возможных комбинаций дополнительных ограничений скорости. При этом построенная оптимальная модель движения обеспечивает согласованное соблюдение графика движения, а сопоставление результатов рекуррентного расчета с прямым моделированием на модели автоведения подтверждает корректность принятой постановки.

Практическая значимость выполненной работы состоит в том, что предложенный алгоритм может быть использован как верхний уровень расчета в составе систем автоведения. Перспективы дальнейшего развития связаны с уточнением структуры штрафных функций в контрольных точках графика и дальнейшей адаптацией алгоритма к использованию в составе полнофункциональных систем автоматического ведения поезда.

Список источников

1. Внедрение системы автоведения для повышения точности управления и энергоэффективности высокоскоростного электропоезда / О. С. Валинский [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, № 1. С. 7–18. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-7-18
2. Юренко К. И., Фандеев Е. И. Принципы построения и имитационное моделирование систем автоведения электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 8 (181). С. 88–102. DOI: 10.18522/2311-3103-2016-8-88102
3. Юренко К. И., Савоськин А. Н., Фандеев Е. И. Математическое моделирование энергооптимальных режимов ведения поезда с учетом возмущений // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. № 3 (184). С. 34–44. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-3-34-44
4. ГОСТ Р 70059-2022. Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении. Принципы построения и основные функциональные требования. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 16 с.

5. Bellman R. Dynamic Programming. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1957. 339 p.
6. Haahr J. T., Pisinger D., Sabbaghian M. A Dynamic Programming Approach for Optimizing Train Speed Profiles with Speed Restrictions and Passage Points // *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2017. Vol. 99. Pp. 167–182. DOI: 10.1016/j.trb.2016.12.016
7. Абляимов О. С. Выбор оптимальных траекторий движения методом динамического пошагового программирования // *Universum: технические науки*. 2020. № 10 (79). С. 35–39.
8. Jong J.-C., Chang S. Algorithms for Generating Train Speed Profiles // *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2005. Vol. 6. Pp. 356–371. DOI: 10.11175/easts.6.356
9. Li Z., Chen L., Roberts C., Zhao N. Dynamic Trajectory Optimization Design for Railway Driver Advisory System // *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2018. Vol. 10, no. 1. Pp. 121–132. DOI: 10.1109/MITS.2017.2776134
10. Gao H., Zhang Y., Guo J. A Novel Dynamic Programming Approach for Optimizing Driving Strategy of Subway Trains // *MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 325. Art. 01002. DOI: 10.1051/mateconf/202032501002

Дата поступления: 10.04.2026

Решение о публикации: 06.05.2026

Контактная информация:

ВАЛИНСКИЙ Олег Сергеевич — кандидат техн. наук, профессор; rector@pgups.ru

ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — доктор техн. наук, профессор; evstafev@pgups.ru

СЫЧУГОВ Антон Николаевич — кандидат техн. наук, доцент; sychugov@pgups.ru

СУХАНОВ Евгений Владимирович — аспирант, ассистент; geneek123@gmail.com

Construction of an Optimal Motion Model for a High-Speed Electric Train Based on Precomputed Transitions and Dynamic Programming

O. S. Valinskiy, A. M. Evstaf'ev, A. N. Sychugov, E. V. Sukhanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Valinskiy O. S., Evstaf'ev A. M., Sychugov A. N., Sukhanov E. V. Construction of an Optimal Motion Model for a High-Speed Electric Train Based on Precomputed Transitions and Dynamic Programming // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 7–21. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-7-21 (In Russian)*

Abstract

Objective: to construct an optimal motion model for a high-speed electric train along a given line section, ensuring coordinated compliance with the timetable, speed limits and stopping conditions on the basis of a developed automatic train operation model, precomputed motion transition characteristics and a recursive dynamic programming procedure. **Methods:** the study employs a developed automatic train operation

model of a high-speed electric train, a segment-based representation of the line section, precomputation of motion transition characteristics and the dynamic programming method. The proposed approach makes it possible to separate the stage of preliminary formation of motion transition characteristics from the stage of optimization-based decision making. For each track segment and each admissible set of input states, the passage results are determined in advance in the form of running time and exit speed, after which step-by-step selection of speed-control restrictions is performed using the Bellman recursive relation. **Results:** an algorithm for constructing an optimal motion model of a high-speed electric train has been developed, it ensures coordinated timetable compliance while preserving the operational automatic train operation model as the computational basis. It is shown that the use of precomputed transitions makes it possible to connect a complex longitudinal motion model with an optimization-based decision-making procedure and to obtain a computational model suitable for further application within automatic train operation algorithms. Simulation results are presented that confirm a small discrepancy between the solution obtained by the dynamic programming method and direct motion simulation performed on the automatic train operation model. **Practical importance:** the proposed approach can be used in the development of automatic train operation algorithms for high-speed electric trains aimed at timetable compliance, improving motion control stability, and forming a substantiated train motion model for a given line section.

Keywords: high-speed electric train, traffic schedule, automatic train control system, dynamic programming, Bellman relation, speed limit, motion optimization

References

1. Valinsky O.S., et al. Vnedrenie sistemy avtovedeniya dlya povysheniya tochnosti upravleniya i energoeffektivnosti vysokoskorostnogo elektropoezda [Implementation of an Automatic Control System to Improve the Operation Accuracy and Energy Efficiency on High-Speed Electric Trains], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 7–18. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-7-18 (In Russian)
2. Yurenko K.I., Fandeev E.I. Printsipy postroeniya i imitatsionnoe modelirovanie sistem avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava [Principles of Construction and Simulation of Automatic Control Systems for Driving Electric Rolling Stock], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFU. Technical Sciences]*, 2016, no. 8 (181), pp. 88–102. DOI: 10.18522/2311-3103-2016-8-88102 (In Russian)
3. Yurenko K.I., Savos'kin A.N., Fandeev E.I. Matematicheskoe modelirovanie energooptimal'nykh rezhimov vedeniya poezda s uchetom vozmushcheniy [Mathematical Modeling of Energy-Optimal Train Driving Modes Under Disturbances], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences]*, 2015, no. 3 (184), pp. 34–44. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-3-34-44 (In Russian)
4. GOST R 70059-2022. Sistemy upravleniya i kontrolya zheleznodorozhnogo transporta dlya perevozk passazhirov v prigorodnom soobshchenii. Printsipy postroeniya i osnovnye funktsional'nye trebovaniya [Rail Transport Control and Monitoring Systems for Suburban Passenger Transportation. Design Principles and Basic Functional Requirements], Moscow, Rossijskij institut standartizatsii [Russian Institute of Standardization], 2022, 16 p. (In Russian)
5. Bellman R. *Dynamic Programming*, NJ, Princeton University Press, 1957, 339 p.

6. Haahr J. T., Pisinger D., Sabbaghian M. A Dynamic Programming Approach for Optimizing Train Speed Profiles with Speed Restrictions and Passage Points, *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2017, vol. 99, pp. 167–182. DOI: 10.1016/j.trb.2016.12.016
7. Ablyalimov O. S. Vybor optimal'nykh traektorij dvizheniya metodom dinamicheskogo poshagovogo programmirovaniya [Selection of Optimal Trajectories of Motion by Dynamic Step by Step Programming], *Universum: Technical Sciences*, 2020, no. 10 (79), pp. 35–39. (In Russian)
8. Jong J.-C., Chang S. Algorithms for Generating Train Speed Profiles, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2005, vol. 6, pp. 356–371. DOI: 10.11175/easts.6.356
9. Li Z., et al. Dynamic Trajectory Optimization Design for Railway Driver Advisory System, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 121–132. DOI: 10.1109/MITS.2017.2776134
10. Gao H., Zhang Y., Guo J. A Novel Dynamic Programming Approach for Optimizing Driving Strategy of Subway Trains, *MATEC Web of Conferences*, 2020, vol. 325, art. 01002. DOI: 10.1051/mateconf/202032501002

Received: April 10, 2026

Accepted: May 06, 2026

Author's information:

Oleg S. VALINSKY — PhD in Engineering, Professor; rector@pgups.ru

Andrey M. EVSTAF'EV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; evstafev@pgups.ru

Anton N. SYCHUGOV — PhD in Engineering, Associate Professor; sychugov@pgups.ru

Evgeniy V. SUKHANOV — Postgraduate Student, Teaching Assistant; geneek123@gmail.com

УДК 629.4.027.25

Проблемы и перспективы совершенствования конструкций и методов испытаний трехосных тележек грузовых вагонов для повышенных осевых нагрузок (на примере промышленного транспорта)

Д. Ю. Петров, Ю. П. Бороненко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Петров Д. Ю., Бороненко Ю. П. Проблемы и перспективы совершенствования конструкций и методов испытаний трехосных тележек грузовых вагонов для повышенных осевых нагрузок (на примере промышленного транспорта) // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 22–42. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-22-42

Аннотация

Цель: анализ эволюции конструкций трехосных тележек грузовых вагонов, обобщение опыта их эксплуатации на промышленном транспорте и критическая оценка современной нормативно-технической базы для обоснования направлений совершенствования методов испытаний при повышенных осевых нагрузках (до 30 тс и более). **Методы:** использованы методы системного анализа научно-технической литературы и патентной информации, обобщение эксплуатационных данных, аналитическое моделирование нагруженности элементов тележек, сравнительный анализ требований нормативных документов. **Результаты:** выявлено, что основной парк трехосных тележек эксплуатируется на путях промышленного транспорта в условиях, существенно отличающихся от магистральных: тяжелый профиль — затяжные уклоны, кривые малого радиуса, переменный профиль; циклические ударные нагрузки при погрузке и разгрузке, усугубляемые отсутствием или неудовлетворительным состоянием балластного слоя на временных путях, что приводит к передаче непогашенных динамических воздействий на ходовые части. Установлено, что 77,8 % отказов связано с несовершенством конструкции. Показано, что действующая система ГОСТов ориентирована преимущественно на пути общего пользования и не учитывает специфику промышленных условий. Предложены аналитические зависимости для оценки дополнительных рамных сил в кривых малого радиуса и для корректировки эквивалентных нагрузок при усталостных испытаниях с учетом реальных спектров нагружения. Сформулированы конкретные направления совершенствования нормативной базы (введение поправочных коэффициентов, обязательное применение износостойких элементов пятникового узла, требования к стендам, разработка спектров нагружения). **Практическая значимость:** обоснована необходимость корректировки нормативной базы и методов сертификационных испытаний трехосных тележек для условий промышленного транспорта. Сформулированы цель и задачи дальнейших исследований, направленных на создание научно обоснованных методов расчета и стендовых испытаний, что позволит повысить надежность и безопасность эксплуатации тяжело нагруженного подвижного состава.

Ключевые слова: трехосная тележка, грузовой вагон, рессорное подвешивание, осевая нагрузка, промышленный транспорт, динамика, прочность, ресурсные испытания, думпкар

Введение

Повышение провозной способности железных дорог и эффективности перевозок тяжеловесных грузов неразрывно связано с увеличением грузоподъемности подвижного состава. Одним из ключевых конструктивных решений, позволяющих

реализовать эту задачу, является применение трехосных тележек. Они позволяют создавать вагоны большой грузоподъемности: транспортеры, думпкары, платформы для тяжеловесных грузов [1, 2].

Несмотря на длительную историю применения, начиная с первой половины XX века, вопросы проектирования, испытаний и безопасной эксплуатации трехосных тележек сохраняют высокую актуальность. Особенно остро эта проблема встает в связи с перспективой внедрения подвижного состава с осевой нагрузкой 30 тс и более. При этом основной зоной эксплуатации таких вагонов являются не магистральные, а промышленные пути (горнорудные предприятия, металлургические комбинаты), характеризующиеся уникальными условиями: затяжными уклонами, кривыми малого радиуса и специфическими динамическими воздействиями, например при погрузке и разгрузке думпкаров [3, 4].

1. Эволюция и классификация конструкций трехосных тележек

Разработка трехосных тележек велась как в России (СССР), так и за рубежом. Анализ патентной и технической литературы [1, 2, 5] позволяет разделить все многообразие конструкций на четыре основные группы по типу рессорного подвешивания: с центральным, буксовым, смешанным и двухступенчатым.

1.1. Тележки с центральным подвешиванием

Эта группа получила наибольшее распространение. Принципиальная схема таких тележек включает шкворневую, продольные и наддресорные балки, а также сочлененные боковые рамы, опирающиеся на колесные пары. Ранние конструкции (КВЗ-1, КВЗ-2, американские тележки Buckeye) использовали шарнирное соединение боковых рам с балансиром средней колесной пары [2, 5].

Наиболее совершенной отечественной разработкой этой группы признана тележка УВЗ-9м (модель 18-102) (рис. 1), производившаяся с 1962 года и ставшая базой для многих последующих моделей (18-522, 18-522А) [6, 7]. Ее особенности: четыре комплекта рессорного подвешивания с пружинно-фрикционными гасителями колебаний, Н-образная литая шкворневая балка и балансирная связь средней колесной пары, обеспечивающая излом рамы в вертикальной и горизонтальной плоскостях для вписывания в кривые и прохождения горочных устройств [5].

1.2. Тележки с буксовым подвешиванием и перспективные разработки

Стремление снизить неподрессоренную массу и улучшить динамику в кривых привело к созданию тележек с буксовым подвешиванием (УВЗ-7, УВЗ-10м) [5, 8]. Здесь гибкая связь между буксой и рамой обеспечивает лучшее вписывание и снижение боковых сил.

В США была создана трехосная тележка фирмы NACO-National Castings (позже — ABC-NACO), модель TA2000 TriAxle (рис. 2). Она разработана на базе

унифицированных модулей Unitruck с независимой подвеской каждой колесной пары по технологии Axle Motion. Благодаря кинематике подвески обеспечивалась радиальная установка осей в кривых, что существенно снижало боковой износ колес и рельсов, а также уменьшало динамическое воздействие на путь [9].

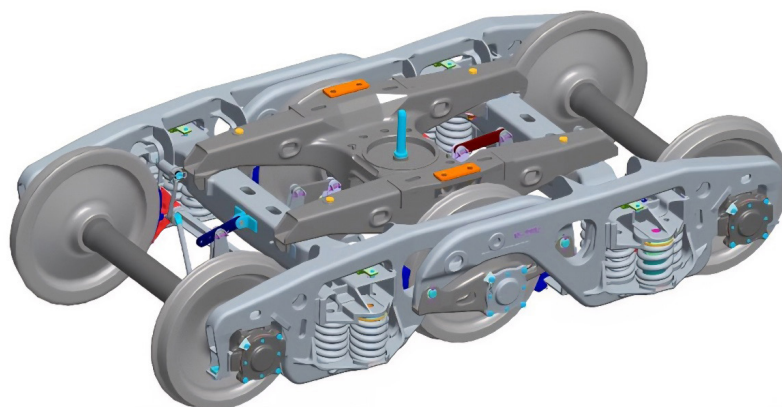


Рис. 1. Тележка УВЗ-9М (18-102).

Источник: «РРТ онлайн», <https://ppt-online.org/315890>

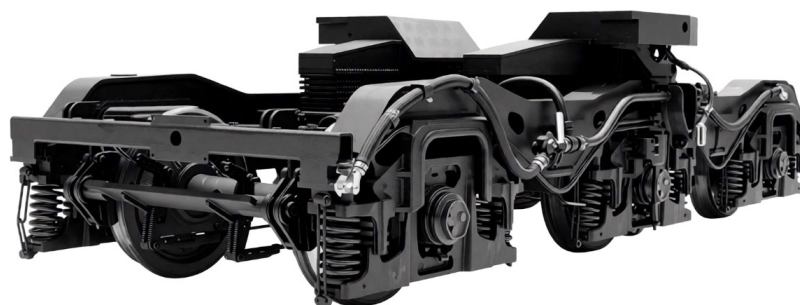


Рис. 2. Трехосная тележка фирмы NACO-National Castings.

Автор: Ю.П. Бороненко, 2016

Тележка проектировалась под осевые нагрузки 25–30 тс, успешно прошла испытания и была сертифицирована для эксплуатации в Великобритании, Швеции и Финляндии, устанавливалась на специализированные вагоны. Однако из-за высокой стоимости по сравнению с традиционными двухосными тележками и отсутствия массового спроса серийного производства не получила.

Разработкой современных трехосных тележек с буксовым подвешиванием в России занимается АО «ВНИКТИ». Результатом этой работы стал национальный стандарт ГОСТ Р 70464-2022 [10]. Стандарт распространяется на трехосные тележки грузовых вагонов с конструкционной скоростью до 140 км/ч. В рамках этой разработки была создана тележка модели 18-6731 (рис. 3) с конструкционной скоростью до 140 км/ч и осевой нагрузкой 20 тс, что позволяет реализовывать использование грузовых вагонов в графике пассажирских поездов.

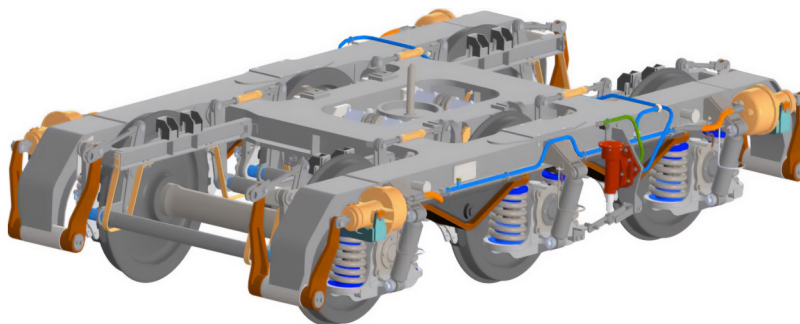


Рис. 3. Тележка модели 18-6731.

Источник: «КиберЛенинка», <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-parametrov-uprugih-skolzunov-i-buksovyh-uzlov-ressornogo-podveshivaniya-trehosnoy-telezhki-na-dinamicheskie-kachestva/viewer>

1.3. Тележки со смешанным подвешиванием

Смешанное подвешивание представляет собой комбинированную схему, при которой двухосная тележка с центральным подвешиванием соединяется с третьей колесной парой посредством дополнительной рамы, имеющей буксовое подвешивание (рис. 4). Такая конструкция позволяет сочетать преимущества обоих типов.

Характерным представителем является тележка модели 18-142, разработанная Калининградским вагоностроительным заводом для шестиосных вагонов-самосвалов (думпкаров) [11]. Она создана на базе двухосной тележки модели 18-131, объединенной с третьей колесной парой при помощи соединительной балки. В двухосной части применено центральное рессорное подвешивание с фрикционными гасителями колебаний, а на третьей колесной паре — буксовое подвешивание.

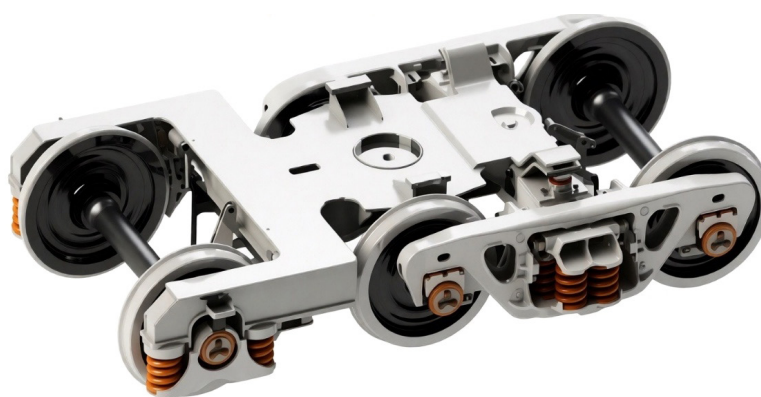


Рис. 4. Тележка со смешанным подвешиванием. Автор: В. С. Коршунов, 2022

Тележка оборудована устройствами, обеспечивающими ее целостность при подъеме, возможном сходе с рельс, а также при воздействии динамических нагрузок, возникающих при разгрузке вагона-самосвала.

1.4. Тележки с двухступенчатым подвешиванием

Двухступенчатое рессорное подвешивание применяется преимущественно в пассажирских вагонах для обеспечения высоких динамических качеств и плавности хода. Примером может служить трехосная пассажирская тележка, спроектированная и построенная Калининским заводом в 1959 году для вагона с массой тары 108 т (рис. 5) [12].

Конструкция тележки включает два уровня подвешивания:

1. Буксовое подвешивание: крайние буксы опираются на цилиндрические пружины с фрикционными амортизаторами, средняя букса — только на цилиндрические пружины.

2. Центральное (люлечное) подвешивание: образовано четырьмя независимыми люльками, подвешенными к продольным балкам рамы. Каждая люлька состоит из поддона с двумя комплектами двухрядных пружин и подвешена на серьгах, что позволяет регулировать высоту наддрессорной балки. Для гашения колебаний над каждой люлькой установлено по два гидравлических амортизатора.

Надрессорная балка имеет сварную конструкцию из двух поперечных и одного продольного бруса, несущего подпятник. Рама тележки также сварная, состоящая из двух продольных, двух поперечных и шести вспомогательных балок. Тележка рассчитана на прохождение кривых радиусом 150 м (на магистральных путях) и 100 м (на заводских путях) [15].



Рис. 5. Трехосная пассажирская тележка. Автор: Ю. П. Бороненко, 2016

1.5. Тележки с радиальной установкой колесных пар

Одним из перспективных направлений улучшения вписывания трехосных тележек в кривые является применение механизмов радиальной установки колесных пар (РУКП). Такие механизмы снижают продольную жесткость связи колесных пар, позволяя им занимать положение, близкое к радиальному, за счет кинематической связи, согласованно поворачивающей все оси тележки [13].

В зарубежной практике известна конструкция по патенту US 5375533 (рис. 6), в которой радиальная установка достигается с помощью косых направляющих тяг, соединяющих концевые колесные пары с рамой, и рычажной системы, передающей движение на среднюю ось [14].

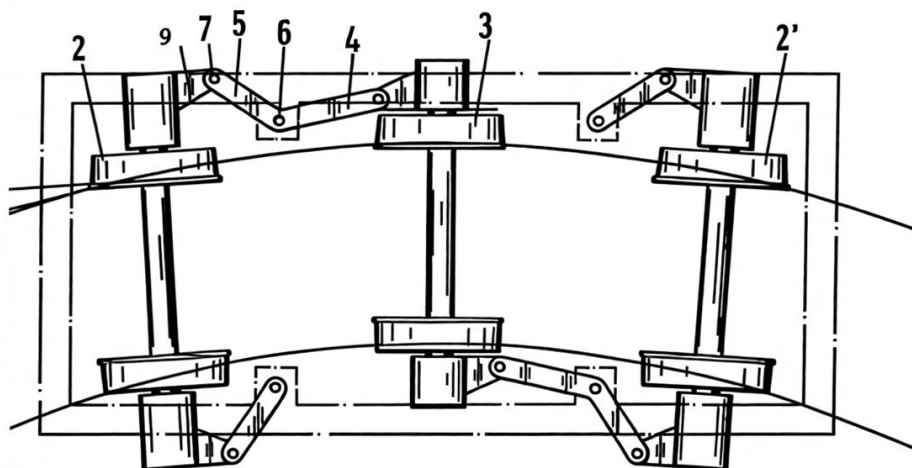


Рис. 6. Конструктивная схема трехосной тележки с РУКП (патент US 5.373.533).

Автор: Ю.П. Бороненко, 2016

Среди отечественных разработок в области РУКП следует отметить патент RU 2677961 C2 [15, 16]. Основные отличия заключаются в том, что балансиры выполнены с пазами, позволяющими консолям боковых рам перемещаться в горизонтальной плоскости без жесткой шарнирной фиксации, а вместо жесткой Н-образной шкворневой балки применена соединительная балка, опирающаяся на две надрессорные балки через крайние пятники и скользуны. Такое решение обеспечивает равномерное распределение вертикальной нагрузки на все три колесные пары (за счет выбора плеч боковых рам) и улучшает вписывание в кривые малого радиуса за счет возможности поворота надрессорных балок с боковыми рамами относительно соединительной балки. Технический результат включает снижение сопротивления движению в кривых, уменьшение износа гребней колес и рельсов, а также повышение устойчивости хода (рис. 7).

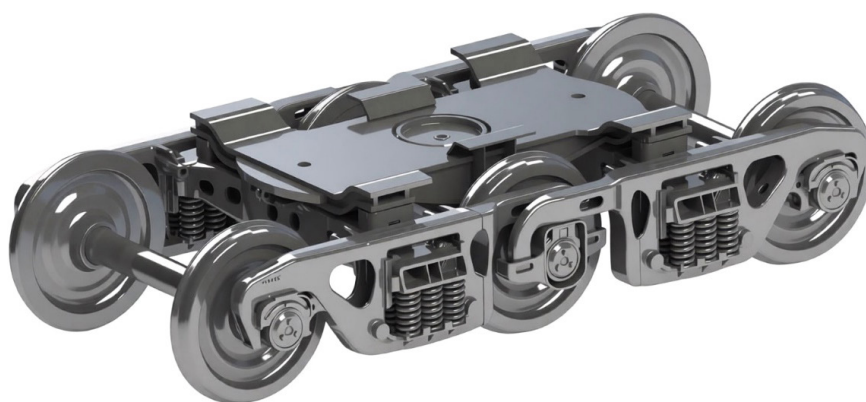


Рис. 7. Конструктивная схема трехосной тележки с РУКП (патент RU 2677961 C2).

Автор: В.С. Коршунов, 2022

1.6. Классификация трехосных тележек

Как справедливо отмечали авторы в своей работе [17], выбор рациональной конструкции тележки и схемы ее подвешивания невозможен без всестороннего обзора существующих конструкций. Анализ и классификация позволяют установить основные направления в развитии конструкций и определить наиболее перспективные типы для заданных условий эксплуатации.

Все трехосные тележки разделяются по двум основным признакам: типу рессорного подвешивания и конструктивному исполнению рамы. В зависимости от способа передачи и распределения вертикальных и горизонтальных нагрузок между колесными парами выделяют четыре группы: с центральным, буксовым, смешанным и двухступенчатым подвешиванием. Внутри каждой группы конструкции различаются типом рамы (сочлененная, составная, цельная, прицепная, сварная) и наличием дополнительных элементов (балансиров, гасителей колебаний) (табл. 1–4).

Как видно из приведенных таблиц, среди тележек с центральным подвешиванием наибольшее распространение получили конструкции с сочлененной рамой и балансиром.

Тележки с цельной рамой и буксовым подвешиванием ориентированы на скоростное движение по качественным магистральным путям, что делает их менее пригодными для тяжелых условий промышленных путей. Конструкции со смешанным и двухступенчатым подвешиванием нашли ограниченное применение ввиду конструктивной сложности и специфичности задач (например, для вагонов-котельных или пассажирских вагонов).

Тележки с РУКП, несмотря на очевидные преимущества (снижение износа гребней, улучшение вписывания), не получили серийного распространения. Все известные решения остались на уровне патентов, опытных образцов или единичных экспериментальных разработок. Высокая конструктивная сложность, увеличение стоимости изготовления и обслуживания, а также отсутствие достаточных инвестиций в условиях промышленного транспорта не позволили довести эти разработки до массового производства.

Таким образом, учитывая, что основной парк трехосных тележек, эксплуатируемых на промышленном транспорте с осевыми нагрузками 30 тс и более, представлен именно тележками с центральным подвешиванием и сочлененной рамой, дальнейший анализ опыта эксплуатации и методов испытаний будет сосредоточен на этом типе конструкций.

ТАБЛИЦА 1. Классификация трехосных тележек грузовых вагонов с центральным подвешиванием (с примерами моделей)

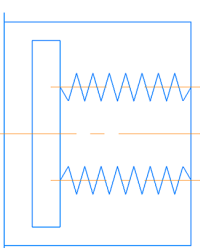
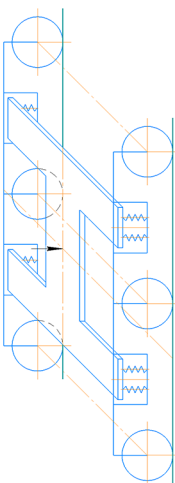
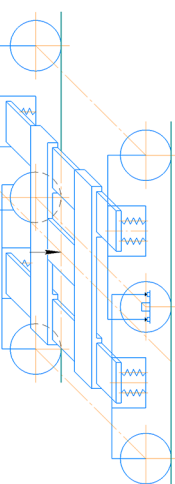
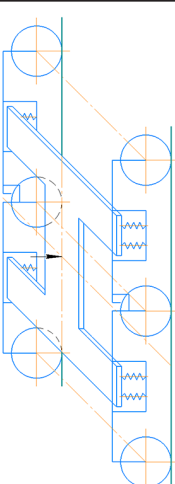
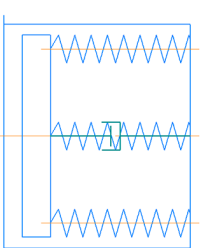
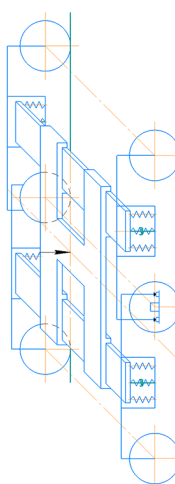
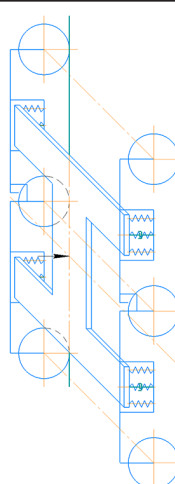
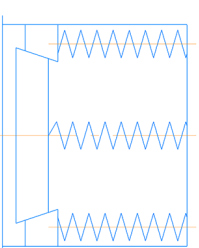
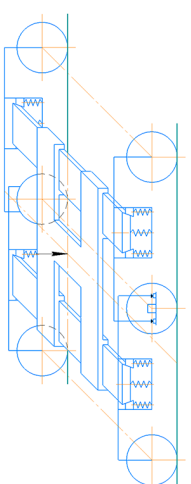
Тип рамы тележки			
Схемы центрального подвешивания	Цельная	Сочлененная	Составная
			
	Тележка ж/д Pennsylvania (США)	Тележки тендера паравоза ФД, КВЗ-1, КВЗ-2 (СССР), Buckeye (США)	Тележки большегрузных вагонов и тяжелых тендеров фирмы ASF (США)
			
		Тележки 18-102 (СССР), 18-522, 18-522А, 18-1245 (Россия), Buckeye (США)	Тележки тендера ж/д Norfolk Western, патент 3250231 (США)
			
		Тележка УВЗ-9к (СССР)	

ТАБЛИЦА 2. Классификация трехосных тележек грузовых вагонов с буксовым подвешиванием (с примерами моделей)

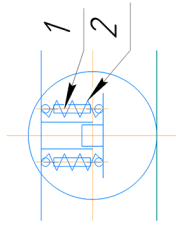
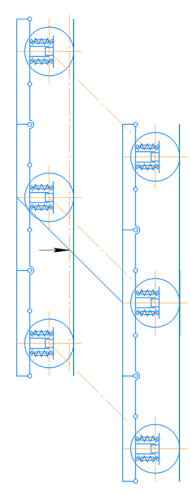
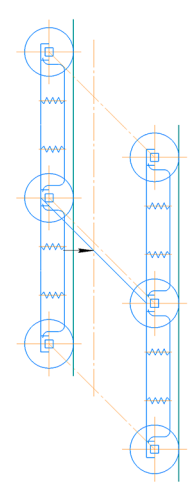
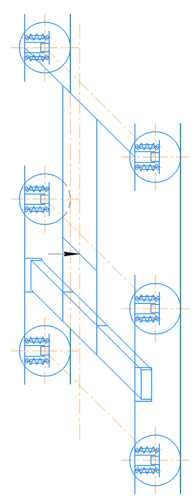
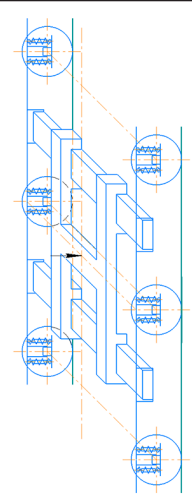
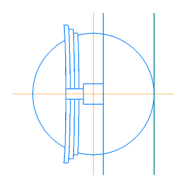
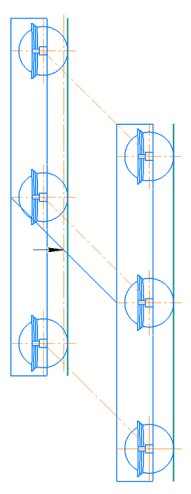
Тип рамы тележки		Тип рамы тележки	
Схема буксового узла	Цельная	Прицепная	Сочлененная
 <p>1 — гаситель колебаний; 2 — упругий элемент</p>	 <p>Тележки КВЗ-4 (СССР), 18-6731 (ВНИКТИ, Россия), тендеров фирмы ALCO и ж/д New York Central, NASCO-National Castings (США), ELH-3, HFB 3.25 (Германия)</p>  <p>Тележки КВЗ-5 (СССР), Common Wealth (США)</p>	 <p>Тележки КВЗ-3, УВЗ с прицепом (СССР)</p>	 <p>Тележки УВЗ-7, УВЗ-10, УВЗ-10М</p>
	 <p>Тележка ВА 714.3 («Тагравагонка», Словакия)</p>		

ТАБЛИЦА 3. Классификация трехосных тележек грузовых вагонов смещенного подвешивания (с примерами моделей)

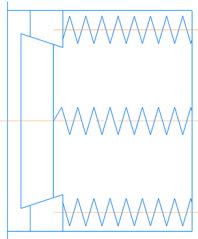
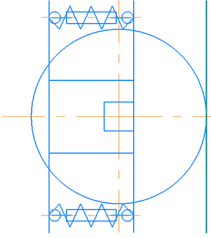
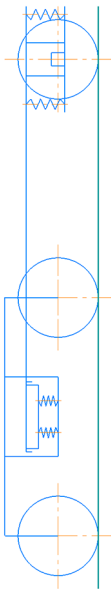
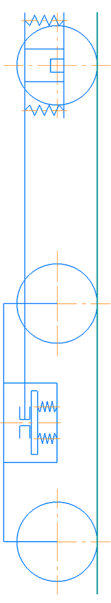
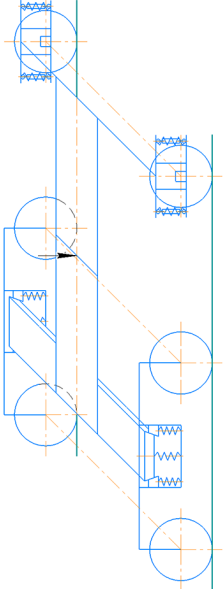
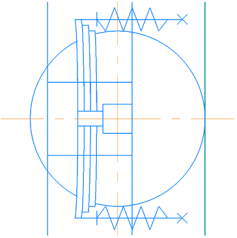
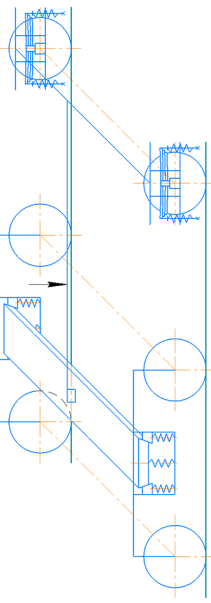
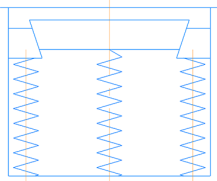
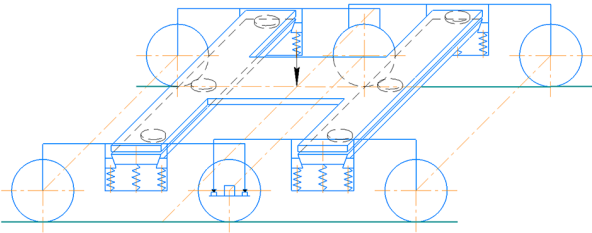
Схема подвешивания		Основные схемы боковых рам	
<p>Центральное для двухосной тележки</p> 	<p>Буксовое для прицепа</p> 		
	 <p>Тележка УВЗ с прицепом 18-142 (СССР)</p>		
			 <p>Тележка вагона-котельной энергопоезда (ЧССР)</p>

ТАБЛИЦА 4. Классификация трехосных тележек грузовых вагонов с РУКП

Схема подвешивания	Схема боковой рамы
	 <p data-bbox="772 595 1171 629">Патент RU 2677961 С2 (Россия)</p>

2. Анализ опыта эксплуатации на промышленном транспорте и причин отказов

Именно на промышленном транспорте трехосные тележки нашли свою основную нишу. В отличие от магистральных сетей общего пользования, где нагрузка на ось ограничена 23,5–25 тс, на подъездных путях горнорудных предприятий и металлургических комбинатов эксплуатируются вагоны-самосвалы (думпкары) с нагрузкой от оси до 32 тс [3]. Как показывают данные [18], объем перевозок промышленным железнодорожным транспортом стабильно превышает объем перевозок транспортом общего пользования почти в 3 раза, что подтверждает доминирующую роль этого сегмента в применении тяжелонагруженных тележек.

Условия эксплуатации на промышленных путях радикально отличаются от магистральных по следующим причинам:

1. Малые радиусы кривых вызывают значительные перекосы тележки в плане и огромные боковые силы. Согласно п. 5.3.3 СП 37.13330.2012 [19], для соединительных и подъездных путей в особо трудных условиях допускаются радиусы 160 м — категории Пп (скорость движения до 25 км/ч) и ППп (скорость движения до 10 км/ч). П. 5.3.4 устанавливает для соединительных путей радиусы до 120 м.

2. Наличие затяжных уклонов и специфических режимов торможения. П. 5.3.12 СП 37.13330.2012 допускает руководящие уклоны до 40% на соединительных путях категорий Пп и ППп, а на путях карьеров и отвалов — до 60%, что требует интенсивного торможения и увеличивает износ тормозного оборудования.

3. Временный характер значительной части подъездных путей, отсутствие или неудовлетворительное состояние балластного слоя, а также циклические ударные нагрузки при погрузке и разгрузке. Согласно п. 5.5.15 СП 37.13330.2012, железобетонные шпалы запрещены к укладке на передвижных путях и в местах, где путь испытывает ударные воздействия при погрузке и выгрузке грузов. П. 5.5.10 допускает для таких путей использование деревянных непропитанных шпал и балласта из вскрышных пород, что снижает демпфирующие свойства пути и приводит к передаче непогашенных ударных нагрузок на ходовые части.

Эти факторы предъявляют особые требования к прочности и износостойкости ходовых частей. Однако, как показывают исследования [20], основная доля отказов трехосных тележек (77,8%) приходится на отказы, связанные с несовершенством конструкций, которые не в полной мере учитывают реалии промышленной эксплуатации. Среди них — технологические: трещины боковой рамы тележки, трещины в шкворневой балке тележки, излом балансира средней колесной пары; эксплуатационные: быстрый износ и трещины гребня средних колесных пар, интенсивный износ пятника и подпятника, излом пружины тележки; повреждения: ползуны колесных пар, горение буксы.

Современные исследования подтверждают актуальность этих проблем. В работе [13] представлены результаты усталостных испытаний литых боковых рам и надрессорных балок тележки модели 18-522А, проведенных на специализированном стенде. Авторами выявлены зоны концентрации напряжений, соответствующие местам возникновения эксплуатационных повреждений, и показано, что существующие методы расчета не в полной мере учитывают реальный спектр нагружения, характерный для тяжелых условий эксплуатации. Это еще раз подчеркивает необходимость совершенствования методов испытаний и корректировки нормативной базы с учетом особенностей работы трехосных тележек на промышленном транспорте.

3. Критический анализ нормативной базы: неучтенные факторы промышленных путей

Переход на осевую нагрузку 30 тс требует не просто адаптации, а качественного пересмотра подходов. Анализ действующей системы ГОСТов показывает, что она не в полной мере готова к этому вызову, и особенно остро этот пробел ощущается именно для условий промышленного транспорта.

3.1. Общие проблемы нормативной базы для нагрузок 30 тс

1. ГОСТ 34763.1-2021 и ГОСТ 34763.2-2021 (требования и методы испытаний) [22, 23] не распространяются на осевую нагрузку 30 тс: их требования ограничены нормативными нагрузками, не превышающими 27 тс. Проектирование и сертификация трехосных тележек для 30 тс ведутся без прямого нормативного регулирования. Кроме того, отсутствуют требования к ресурсным испытаниям пятникового узла, который испытывает высокие контактные напряжения в ходе эксплуатации.

2. ГОСТ 34717-2021, ГОСТ 34769-2021, ГОСТ 34767-2021 (требования к литью) [24–26], как и предыдущие стандарты, не учитывают нагрузку 30 тс.

3. ГОСТ 33211-2014 (требования к прочности и динамическим качествам) [27] использует усредненные динамические коэффициенты для нагрузок 23,5 тс и 25 тс, которые могут недооценивать пиковые нагрузки для 30 тс.

3.2. Специфика промышленных путей: что не учитывают ГОСТы

Главный недостаток действующей системы стандартов заключается в том, что она ориентирована на идеализированные условия магистральных путей. Рассмотрим ключевые факторы, остающиеся за кадром.

1. Отсутствие норм для кривых малого радиуса.

Нормативы по воздействию на путь по ГОСТ 34759-2021 [28] рассчитываются для типовых условий в кривой радиусом 300–400 м. В кривых малого радиуса возникают значительные дополнительные нагрузки из-за перекаса тележки и набегания гребней. Рама трехосной тележки обладает высокой жесткостью в горизонтальной плоскости, что препятствует свободному вписыванию.

Согласно ГОСТ 34763.1-2021 [22], при проверке прочности несущей конструкции тележки необходимо учитывать боковую силу. Данная сила рассчитывается по формуле:

$$P_{N1} = N \left[\frac{\delta \cdot L}{I_B^2} \left(1 + \frac{L}{\alpha} \right) + \frac{L_c}{R} \right],$$

где N — продольная сила, Н;

δ — боковое перемещение, м;

$2L$ — расстояние между задними опорными поверхностями упоров автосцепных устройств, м;

$2I_B$ — база вагона, м;

α — расчетная длина корпуса автосцепки, м;

$2L_c$ — длина вагона по осям сцепления, м;

R — радиус кривой, м.

Как видно из приведенных зависимостей, с уменьшением радиуса кривой R рамные силы возрастают нелинейно: содержат составляющую $\sim 1/R$ (гиперболическая зависимость). Однако в стандарте при типовых расчетах рекомендуется принимать нормативный радиус $R = 250$ м [14], что не учитывает реальных условий эксплуатации на промышленных путях с радиусами до 120 м. Действующие стандарты не предписывают обязательной проверки тележек на прочность и выносливость при прохождении кривых радиусом менее 250 м, что не соответствует реальным условиям эксплуатации на промышленных путях.

2. Неопределенность спектра нагружения и интервалов скоростей движения для расчета ресурса.

Расчет на сопротивление усталости по ГОСТ 33211-2014 [27] требует знания спектра нагрузок, то есть распределения амплитуд динамических сил за срок службы. Для магистральных вагонов такие спектры известны и включают определенные интервалы скоростей движения. Для промышленного транспорта, где маршруты короткие, а режимы работы тяжелые, спектр и интервалы скоростей будут совершенно иными. Отсутствие регламентированных интервалов скоростей

движения и достоверных данных о распределении нагрузок для вагонов промышленного транспорта приводит к снижению точности оценки ресурса.

3. Отсутствие требований к учету неровностей пути при оценке динамических качеств.

Возмущения со стороны пути (неровности рельсовых нитей в вертикальной и горизонтальной плоскостях) являются одним из ключевых факторов, определяющих динамические нагрузки на ходовые части вагона.

В работе [29] показано, что существующие аналитические подходы и наборы табличных значений неровностей пути, регламентируемые РД 32.68-96 [30] и ПНСТ 511-2020 [31], не унифицированы и могут приводить к отличающимся показателям качества хода вагонов. Для устранения этого необходим единый стандарт, основанный на анализе натуральных неровностей железных дорог РФ и последующей апробации предлагаемых расчетных моделей в различных научно-исследовательских центрах.

Для промышленных путей, характеризующихся более высоким уровнем неровностей (просадки, перекосы, волнообразный износ) и отсутствием систематизированной базы данных об их параметрах, эта проблема становится еще более острой. Применение расчетных неровностей, разработанных для магистральных путей, при моделировании движения по промышленным путям приводит к занижению динамических нагрузок и, как следствие, к некорректной оценке прочности и ресурса. Если даже для магистральных путей отсутствует унифицированный стандарт расчетных неровностей, то для промышленного транспорта, где пути имеют существенно более высокий уровень неровностей и менее строгий нормативный контроль, этот пробел становится критическим.

Отсутствие нормативных требований к учету неровностей промышленных путей и систематизированной базы данных о них создает дополнительный нормативный пробел, требующий проведения натуральных измерений и разработки соответствующих рекомендаций.

3.3. Выводы по нормативной базе

Существующая система стандартов формирует лишь базовую основу, ориентированную на магистральные пути. Она позволяет сертифицировать тележку, формально соответствующую требованиям, но ее работоспособность в суровых условиях промышленного транспорта остается под вопросом. Это создает зону повышенного технического риска.

3.4. Направления совершенствования нормативной базы и методов испытаний

Проведенный в разделе 1 анализ конструкций трехосных тележек показал, что, несмотря на многолетнюю эволюцию, многие из них имеют принципиальные недостатки: высокий износ пятникового узла, неравномерное распределение

нагрузки между колесными парами, недостаточную способность к вписыванию в кривые малого радиуса, а также недостаточную надежность несущих элементов даже при осевых нагрузках до 25 тс. Эти недостатки требуют комплексного подхода, включающего как совершенствование самой конструкции, так и корректировку методов ее испытаний и нормативной базы.

Для устранения выявленных недостатков и создания научно обоснованной базы для корректировки нормативных документов необходимо выполнить комплекс взаимосвязанных исследований, включающих:

1. Совершенствование конструкции трехосной тележки на основе анализа существующих решений.

С учетом выявленных недостатков существующих тележек и требований к эксплуатации на промышленных путях с увеличенной осевой нагрузкой до 30 тс предлагается разработать усовершенствованную конструкцию тележки, ориентированную на повышенную надежность и ремонтпригодность. Основные направления:

- усиленная конструкция основных несущих элементов (боковых рам, надрессорных и шкворневой балок, балансиров), обеспечивающая восприятие повышенных динамических нагрузок в кривых малого радиуса и при технологических операциях;

- конструктивная защита пятникового узла (применение износостойких полимерных прокладок) для снижения контактных напряжений и износа при повышенных осевых нагрузках;

- применение колесных пар с адаптерами и кассетными подшипниками, позволяющее повысить надежность буксового узла и упростить техническое обслуживание;

- снижение нагрузок на среднюю ось путем совершенствования узла опирания и балансира.

2. Определение фактических нагрузок методами моделирования и их экспериментальная верификация.

С использованием динамических моделей трехосной тележки (с помощью ПК «Универсальный механизм») провести виртуальные эксперименты для определения нагрузок, действующих на основные элементы трехосной тележки при прохождении кривых радиусом до 120 м с учетом неровностей промышленных путей. Интервалы скоростей движений предлагается взять путем анализа скоростемерных лент локомотивов, эксплуатируемых на промышленных путях. Полученные данные сравнить с результатами ходовых испытаний.

3. Проведение стендовых и ходовых испытаний усовершенствованной конструкции.

Изготовить опытный образец тележки с учетом предложенных конструктивных изменений и провести его стендовые ресурсные испытания (в том числе

пятникового узла) с использованием разработанной оснастки, а затем ходовые испытания на промышленных путях. Верифицировать разработанные модели и методики.

4. Корректировка нормативной базы на основе результатов моделирования, стендовых и ходовых испытаний.

По результатам верифицированных моделей и испытаний обосновать повышающие коэффициенты к расчетным нагрузкам для кривых радиусом менее 250 м и для учета технологических ударных нагрузок и внести их в ГОСТ 34763.1-2021 [22] и ГОСТ 33211-2014 [27]. Разработать требования к стендовым испытаниям и включить их в ГОСТ 34763.2-2021 [23]. Предложить изменения в конструкцию, подтвержденные испытаниями, для включения в технические условия на тележки.

Реализация предложенных направлений позволит создать научно обоснованную базу для корректировки нормативных документов и разработки усовершенствованной конструкции трехосной тележки, обеспечивающей надежную и безопасную работу при осевых нагрузках 30 тс и более в тяжелых условиях промышленного транспорта.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что трехосные тележки являются востребованным типом ходовых частей для тяжеловесного движения, причем их основной парк эксплуатируется на промышленных путях в условиях, существенно отличающихся от магистральных. Высокая доля конструкционных отказов и несовершенство действующей нормативной базы, не учитывающей специфику этих условий, требуют проведения дополнительных исследований и создания усовершенствованной конструкции трехосной тележки для осевых нагрузок свыше 27 тс.

Список источников

1. Подвижной состав и тяга поездов / под общ. ред. А.П. Третьякова. М.: Транжелдориздат, 1961. 320 с.
2. The Car and Locomotive Cyclopedia of American Practices. Sixth Edition / ed. by W.W. Kratville. Omaha: Simmons-Boardman Books, 1997. 850 p.
3. Логинов А. И., Афанаскин Н. Е. Вагоны-самосвалы. М.: Машиностроение, 1975. 192 с.
4. Гоник М. Е. Об оптимальных параметрах думпкаров для открытой разработки // Записки Горного института. 1958. Т. 36, вып. 1. С. 256–264.
5. Тележки железнодорожных вагонов / под ред. Л. А. Шадура. М.: ГОСИНТИ, 1959. 256 с.
6. Грачева Л. О., Анисимов П. С. Конструктивные особенности и динамические качества трехосной тележки типа УВЗ-9м // Труды ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1966. Вып. 312. С. 45–58.
7. Конструкции вагонов / под ред. Л. А. Шадура М.: Всесоюзное издательско-полиграфическое объединение МПС, 1962. 288 с.

8. Речкалов А. И. Какие тележки надо строить для шестиосных полувагонов? // Железнодорожный транспорт. 1962. № 2. С. 44–46.
9. TTX Front Runner Spine Cars // Trains.com Forum. URL: <https://forum.trains.com/> (дата обращения: 10.02.2026).
10. ГОСТ Р 70464-2022. Тележки с буксовым рессорным подвешиванием трехосные грузовых вагонов. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2022. 28 с.
11. Сайт ОАО «Калининградский вагоностроительный завод». URL: <http://kvz39.ru> (дата обращения: 10.02.2026).
12. Морозов И. А. Тележки пассажирских вагонов отечественного производства. М.: Машгиз, 1960. 176 с.
13. Трехосная тележка с радиально устанавливаемыми колесными парами: пат. 88329 U1 Российская Федерация, МПК В61F 5/38. №2009123456 / ОАО «ВНИКТИ»; заявл. 22.06.2009; опубл. 10.11.2009. Бюл. № 31. 4 с.
14. Running Gear for Rail Vehicles With Radial Control of the Wheelsets: pat. 5375533 USA, IPC В61F 5/38. No. 08/213,372 / Schuller H.; filed 15.03.1994; publ. 27.12.1994. 10 p.
15. Трехосная тележка: пат. 2677961 С2 Российская Федерация, МПК В61F 3/10. №2017119270 / Бороненко Ю.П., Коршунов В.С.; заявл. 02.06.2017; опубл. 22.01.2019. Бюл. №3. 8 с.
16. Коршунов В. С., Цыганская Л. В., Хохлов С. В. Выбор конструктивной схемы трехосной тележки с радиальной установкой колёсных пар с осевой нагрузкой 25 тс // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XII Международной научно-технической конференции. СПб.: ПГУПС, 2017. С. 117–119.
17. Челноков И. И., Смарагдов Г. И., Бабаев А. М. Анализ конструкции трехосных тележек грузовых вагонов // Динамика подвижного состава: сборник трудов / ред. И. И. Челноков. Ленинград: ЛИИЖТ, 1969. С. 132–139.
18. Дудкин Е. П., Ильин А. А., Черняева В. А. Промышленный транспорт: учебное пособие. СПб.: ПГУПС, 2017. 83 с.
19. СП 37.13330.2012. Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91* (с изм. № 1–7). М.: Стандартинформ, 2023. 156 с.
20. Анализ работы трехосных тележек: отчет о НИР / рук. Е. П. Дудкин; Л.: ЛИИЖТ, 1986. 22 с. Рег. № 0286.0115957.
21. Баранов А. Н., Ефимов В. П. Усталостные испытания литых несущих деталей трехосной тележки модели 18-522А // Известия ПГУПС. 2018. № 1. С. 5–16.
22. ГОСТ 34763.1-2021. Тележки трех- и четырехосные грузовых вагонов железных дорог. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2021. 16 с.
23. ГОСТ 34763.2-2021. Тележки трех- и четырехосные грузовых вагонов железных дорог. Правила приемки и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2021. 20 с.
24. ГОСТ 34717-2021. Рама боковая и балка наддресорная литые трехосных тележек грузовых вагонов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2021. 14 с.
25. ГОСТ 34769-2021. Балка шкворневая трехосных тележек грузовых вагонов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2021. 12 с.

26. ГОСТ 34767-2021. Балансир трехосных тележек грузовых вагонов. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2021. 10 с.
27. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамические качества. М.: Стандартиформ, 2014. 28 с.
28. ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. М.: Стандартиформ, 2021. 18 с.
29. Саидова О. В. Оценка влияния неровностей и модели рельсового пути на динамические качества грузового вагона // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2022. Т. 81, № 4. С. 250–258.
30. РД 32.68-96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. М.: МПС РФ, 1996. 35 с.
31. ПНСТ 511-2020. Вагоны грузовые. Расчетные неровности железнодорожного пути для оценки показателей динамических качеств грузовых вагонов расчетными методами. М.: Стандартиформ, 2021. 24 с.

Дата поступления: 19.03.2026

Решение о публикации: 21.04.2026

Контактная информация:

ПЕТРОВ Даниил Юрьевич — аспирант; daniil.petrov21.09.1997@yandex.ru

БОРОНЕНКО Юрий Павлович — доктор техн. наук, профессор; boron49@yandex.ru

Problems and Prospects of Improving the Design and Testing Methods of Three-Axle Trolleys for Freight Cars with Increased Axial Loads (Based on Industrial Transport)

D. Yu. Petrov, Yu. P. Boronenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Petrov D. Yu., Boronenko Yu. P. Problems and Prospects of Improving the Design and Testing Methods of Three-Axle Trolleys for Freight Cars with Increased Axial Loads (Based on Industrial Transport) // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 22–42. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-22-42 (In Russian)*

Abstract

Objective: to analyze the evolution of three-axle freight car bogie designs, summarize the experience of their operation in industrial transport, and critically evaluate the current regulatory framework to substantiate areas for improving testing methods for increased axle loads (up to 30 tf or more). **Methods:** methods of system analysis of scientific and technical literature and patent information, generalization of operational data, analytical modeling of bogie element loading, and a comparative analysis of regulatory requirements were used. **Results:** it was revealed that the main fleet of three-axle bogies is operated on industrial transport tracks

under conditions significantly different from main roads (heavy profile (long slopes, small-radius curves, variable profile), cyclic impact loads during loading and unloading, aggravated by the absence or poor condition of the ballast layer on temporary tracks, which leads to the transfer of unabsorbed dynamic effects to the chassis). It was found that 77.8 % of failures are associated with design imperfections. It is shown that the current system of GOSTs is oriented primarily towards public tracks and does not take into account the specifics of industrial conditions. Analytical relationships are proposed for estimating additional frame forces in small-radius curves and for adjusting equivalent loads during fatigue testing, taking into account actual loading spectra. Specific areas for improving the regulatory framework are identified (introduction of correction factors, mandatory use of wear-resistant center plate components, requirements for test rigs, and development of load spectra). **Practical importance:** the need to adjust the regulatory framework and certification test methods for three-axle bogies for industrial transport conditions is substantiated. The goals and objectives of further research aimed at developing scientifically sound calculation and test rig methods are formulated, thereby improving the reliability and safety of heavy-duty rolling stock.

Keywords: three-axle trolleys, freight car, spring suspension, axle load, industrial transport, dynamics, strength, endurance testing, dump car

References

1. Podvizhnoj sostav i tyaga poezdov [Rolling Stock and Train Traction], ed. by A. P. Tret'yakov, Moscow, Transzheldorizdat, 1961, 320 p. (In Russian)
2. The Car and Locomotive Cyclopedia of American Practices. 6th ed., ed. by W. W. Kratville, Omaha, Simmons-Boardman Books, 1997, 850 p.
3. Loginov A. I., Afanaskin N. E. Vagony-Samosvaly [Dump Trucks], Moscow, Mashinostroenie, 1975, 192 p. (In Russian)
4. Gonik M. E. Ob optimal'nykh parametrakh dumpkarov dlya otkrytoj razrabotki [On the Optimal Parameters of Dump Trucks for Open-Pit Mining], *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 1958, vol. 36, iss. 1, pp. 256–264. (In Russian)
5. Telezhki zheleznodorozhnykh vagonov [Trolleys of Railway Wagons], ed. by L. A. Shadura, Moscow, GOSINTI [All-Russian Institute for Scientific and Technical Information], 1959, 256 p. (In Russian)
6. Gracheva L. O., Anisimov P. S. Konstruktivnye osobennosti i dinamicheskie kachestva trekhosnoj telezhki tipa UVZ-9m [Design Features and Dynamic Qualities of the UVZ-9m Three-Axle Truck], *Trudy VNIIZhT [Railway Research Institute Bulletin]*, Moscow, Transport, 1966, iss. 312, pp. 45–58. (In Russian)
7. Konstruktsii vagonov [Wagon Designs], ed. by L. A. Shadura, Moscow, Vsesoyuznoe izdatel'sko-poligraficheskoe ob"edinenie MPS, 1962, 288 p. (In Russian)
8. Rechkalov A. I. Kakie telezhki nado stroit' dlya shestiosnykh poluvagonov? [What Kind of Bogies Should Be Built for Six-Axle Semi-Wagons?], *Zheleznodorozhnyj transport [Railway Transport]*, 1962, no. 2, pp. 44–46. (In Russian)
9. TTX Front Runner Spine Cars. URL: <https://forum.trains.com/> (accessed: February 10, 2026).
10. GOST R 70464-2022. Telezhki s buksovyim resornym podveshivaniem trekhosnye gruzovykh vagonov. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Trolleys with Axle Suspension for Three-Axle Freight Cars. General Technical Conditions], Moscow, Standartinform, 2022, 28 p. (In Russian)
11. OAO "Kaliningradskij vagonostroitel'nyj zavod" [Kaliningrad Carriage Factory OJSC]. URL: <http://kvz39.ru> (accessed: February 10, 2026). (In Russian)

12. Morozov I.A. *Telezhki passazhirskikh vagonov otechestvennogo proizvodstva* [Trolleys of Passenger Cars Of Domestic Production], Moscow, Mashgiz, 1960, 176 p. (In Russian)
13. Pat. 88329 U1 Russian Federation, MPK B61F 5/38, *Trekhnaya telezhka s radial'no ustanavlivayushchimisya kolesnymi parami* [A Three-Axle Trolley with Radially Mounted Wheelsets], OAO "VNIKTIP" [JSC "VNIKTIP"], no. 2009123456; filed. 22.06.2009; publ. 10.11.2009, 4 p. (In Russian)
14. Schuller H. Pat. 5375533 USA, IPC B61F 5/38. *Running Gear for Rail Vehicles with Radial Control of the Wheelsets*, no. 08/213,372; filed. 15.03.1994; publ. 27.12.1994. 10 p.
15. Korshunov V.S., Boronenko Yu.P. Pat. 2677961 C2 Russian Federation, MPK B61F 3/10. *Trekhnaya telezhka* [Three-Axle Trolley], no. 2017119270; filed. 02.06.2017; publ. 22.01.2019, bull. no. 3, 8 p. (In Russian)
16. Korshunov V.S., Tsyganskaya L.V., Khokhlov S.V. *Vybor konstruktivnoj skhemy trekhnnoj telezhki s radial'noj ustanovkoj kolyosnykh par s osevoj nagruzkoy 25 ts* [Selection of a Structural Scheme for a Three-Axle Trolley with a Radial Installation of Wheelsets with an Axial Load of 25 Ton-Forces], *Podvizhnoj sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferentsii* [Rolling Stock of the 21st Century: Ideas, Requirements, and Projects: Proceedings of the 16th International Scientific and Technical Conference], Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University], 2017, pp. 117–119. (In Russian)
17. Chelnokov I.I., Smaragdov G.I., Babaev A.M. *Analiz konstruksii trekhnnykh telezhek gruzovykh vagonov* [Analysis of the Design of Three-Axle Freight Car Trolleys], *Dinamika podvizhnogo sostava: sbornik trudov* [Dynamics of Rolling Stock: Collection of Papers], ed. by I.I. Chelnokov, Leningrad: LIIZhT, 1969, pp. 132–139. (In Russian)
18. Dudkin E.P., Il'in A.A., Chernyaeva V.A. *Promyshlennyj transport: uchebnoe posobie*. [Industrial Transport: A Textbook], Saint-Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University], 2017, 83 p.
19. SP 37.13330.2012. *Promyshlennyj transport. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.05.07-91** (s izmeneniyami № 1–7) [Industrial Transport. Updated version of SNIp 2.05.07-91* (with amendments no. 1–7)], Moscow, Standartinform, 2023, 156 p. (In Russian)
20. *Analiz raboty trekhnnykh telezhek: otchyot o NIR* [Analysis of the Operation of Three-Axle Trolleys: Research Report], direct. E.P. Dudkin, Leningrad Institute of Railway Engineers, 1986, 22 p., reg. no. 0286.0115957. (In Russian)
21. Baranov A.N., Efimov V.P. *Ustalostnye ispytaniya litykh nesushchikh detalej trekhnnoj telezhki modeli 18-522A* [Fatigue Testing of Cast Bearing Parts of a Three-Axle Trolley Model 18-522A], *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg State Transport University], 2018, no. 1, pp. 5–16. (In Russian)
22. GOST 34763.1-2021. *Telezhki trekh- i chetyrekhnosnye gruzovykh vagonov zheleznykh dorog. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Bogies of Three- and Four-Axle Freight Wagons of Railways. General Technical Conditions], Moscow, Standartinform, 2021, 16 p. (In Russian)
23. GOST 34763.2-2021. *Telezhki trekh- i chetyrekhnosnye gruzovykh vagonov zheleznykh dorog. Pravila priyomki i metody ispytaniy* [Trolleys of Three- and Four-Axle Freight Wagons of Railways. Acceptance Rules and Test Methods], Moscow, Standartinform, 2021, 20 p. (In Russian)

24. GOST 34717-2021. Rama bokovaya i balka nadressornaya litye trekhosnykh telezhek gruzovykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya [The Side Frame and the Suspension Beam Are Cast Three-Axle Trolleys of Freight Wagons. Technical Specifications], Moscow, Standartinform, 2021, 14 p. (In Russian)

25. GOST 34769-2021. Balka shkvornevaya trekhosnykh telezhek gruzovykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya [Pivot Beam of Three-Axle Trolleys of Freight Wagons. Technical Specifications], Moscow, Standartinform, 2021, 12 p. (In Russian)

26. GOST 34767-2021. Balansir trekhosnykh telezhek gruzovykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya [The Balancer of Three-Axle Trolleys of Freight Wagons. Technical Specifications], Moscow, Standartinform, 2021, 10 p. (In Russian)

27. GOST 33211-2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskie kachestva [Freight Cars. Strength Requirements and Dynamic Qualities], Moscow, Standartinform, 2014, 28 p. (In Russian)

28. GOST 34759-2021. Zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav. Normy dopustimogo vozdejstviya na zheleznodorozhnyj put' i metody ispytaniy [Railway Rolling Stock. Standards of Permissible Impact on the Railway Track and Test Methods], Moscow, Standartinform, 2021, 18 p. (In Russian)

29. Saidova O. V. Otsenka vliyaniya nerovnostej i modeli rel'sovogo puti na dinamicheskie kachestva gruzovogo vagona [Assessment of the Impact of Track Irregularities and Models on the Dynamic Qualities of Freight Wagons], *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Russian Railway Science Journal]*, 2022, vol. 81, no. 4, pp. 250–258. (In Russian)

30. RD 32.68-96. Raschyotnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya ispol'zovaniya pri issledovaniyakh i proektirovanii passazhirskikh i gruzovykh vagonov [Calculated Railway Track Irregularities for Use in the Research and Design of Passenger and Freight Wagons], Moscow, Ministry of Railways of the Russian Federation, 1996, 35 p. (In Russian)

31. PNST 511-2020. Vagony gruzovye. Raschyotnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya otsenki pokazatelej dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov raschyotnymi metodami [Freight Cars. Calculated Unevenness of a Railway Track for Evaluation of Dynamic Qualities of Freight Wagons by Calculation Methods], Moscow, Standartinform, 2021, 24 p. (In Russian)

Received: March 19, 2026

Accepted: April 21, 2026

Author's information:

Daniil Yu. PETROV — Postgraduate Student; daniil.petrov21.09.1997@yandex.ru

Yurij P. BORONENKO — Dr. Sci. in Engineering, Professor; boron49@yandex.ru

УДК.629.463.12

Теплоизоляционные материалы в конструкции изотермического подвижного состава

С. В. Буриков^{1,2}, Л. В. Цыганская^{1,2}

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² АО «Научно-внедренческий центр «Вагоны», Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 22м

Для цитирования: Буриков С.В., Цыганская Л. В. Теплоизоляционные материалы в конструкции изотермического подвижного состава // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 43–52. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-43-52

Аннотация

В статье проведен обзор теплоизоляционных материалов и выполнена расчетная оценка необходимых толщин теплоизоляции, применяемой в конструкции изотермического подвижного состава, предназначенного для перевозки скоропортящихся грузов с обеспечением заданного температурного режима. **Цель:** систематизация и сравнительный анализ теплоизоляционных материалов, используемых в ограждающих конструкциях изотермических вагонов, а также определение наиболее эффективных решений для обеспечения стабильного температурного режима при перевозке скоропортящихся грузов в различных климатических и эксплуатационных условиях. **Результаты:** проанализированы основные виды теплоизоляции с учетом их коэффициента теплопроводности, физико-механических свойств, влагостойкости, огнестойкости и эксплуатационной долговечности. Приведена сравнительная характеристика традиционных и современных теплоизоляционных материалов (пенополиуретан, пенополистиролы, минеральная вата, пеностекло, вакуумные изоляционные панели и др.), а также определены их преимущества, недостатки и целесообразность применения в ограждающих конструкциях кузова. Установлено, что пенополиуретан и экструдированный пенополистирол являются основными материалами для теплоизоляции стен, крыш и полов изотермических вагонов благодаря оптимальному сочетанию низкой теплопроводности, механической прочности и влагостойкости. Показано, что применение вакуумных изоляционных панелей позволяет существенно уменьшить толщину ограждающих конструкций и увеличить полезный объем грузового помещения до 10 % при сохранении внешних габаритов вагона. **Практическая значимость:** разработанные рекомендации по выбору теплоизоляционных материалов могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих изотермических вагонов для повышения эффективности перевозок скоропортящихся грузов. Полученные результаты позволяют обоснованно подходить к выбору изоляции с учетом баланса между теплотехнической эффективностью, долговечностью и экономическими затратами, что способствует снижению потерь при перевозке продукции и продлению срока службы подвижного состава.

Ключевые слова: изотермический подвижной состав, рефрижераторный вагон, вагон-термос, теплоизоляционные материалы, коэффициент теплопроводности, теплоизоляция кузова

Изотермический подвижной состав предназначен для перевозки скоропортящихся грузов с обеспечением стабильного температурного режима в течение всего периода транспортировки. Поддержание заданной температуры достигается за счет применения эффективных теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях кузова (стены, пол, крыша), что позволяет минимизировать теплоперенос между внутренним объемом вагона и окружающей средой [1].

Теплоизоляция в изотермическом подвижном составе должна обеспечивать не только низкую теплопроводность, но и устойчивость к вибрациям, влаге, механическим нагрузкам, температурным перепадам и требованиям пожарной безопасности [2]. Учет этих требований является определяющим при выборе конкретного типа изоляции для различных узлов вагона. Структура теплоизоляционного материала (закрытоячеистая или волокнистая) существенно влияет на его эксплуатационные свойства и долговечность [3].

Развитие конструкций изотермических вагонов сопровождалось эволюцией применяемых материалов — от простых волокнистых теплоизоляторов к современным высокоэффективным полимерным и вакуумным панелям. В настоящей работе проведен анализ основных видов теплоизоляционных материалов, их свойств и целесообразности применения в конструкции изотермического подвижного состава.

Материалы, применявшиеся в первых изотермических вагонах

На ранних этапах развития изотермического подвижного состава использовались преимущественно волокнистые и пористые материалы, такие как минеральная вата, базальтовое волокно и карбамидно-формальдегидные пенопласты.

Минеральная вата использовалась в виде матов или плитных теплоизоляторов с относительно низкой теплопроводностью и высокой огнестойкостью. Однако ее высокая гигроскопичность, способность к уплотнению, а также необходимость пароизоляции ограничивали эффективность в условиях транспортной эксплуатации [4].

Базальтовое волокно (каменная вата) отличалось от минеральной ваты еще более высокой огнестойкостью и звукоизоляционными свойствами, но также требовало защиты от влаги и обладало значительной плотностью, что увеличивало массу конструкции [4].

Карбамидно-формальдегидные пенопласты, такие как мипора, применялись в виде легких заливных утеплителей. Более современным вариантом этих материалов является пеноизол, который демонстрировал удовлетворительные теплоизоляционные свойства, но его высокая гигроскопичность, склонность к усадке, невысокая механическая прочность под вибрациями ограничивали его применение в изотермических вагонах и контейнерах [5].

Современные основные теплоизоляционные материалы

В современных ограждающих конструкциях изотермических вагонов доминируют полимерные материалы с закрытой ячеистой структурой, обладающие высокой эффективностью и эксплуатационной стабильностью.

Пенополиуретан (PUR) остается одним из основных теплоизоляционных материалов благодаря низкой теплопроводности, малой плотности и высокой меха-

нической прочности. Его закрытоячеистая структура обеспечивает минимальное водопоглощение и устойчивость к вибрациям, что важно для подвижного состава [6]. Использование пенополиуретана наряду с новыми техническими решениями позволяет создавать новые эффективные вагоны-термосы [7].

Экструдированный пенополистирол (XPS) отличается высокой долговечностью, низким водопоглощением и достаточной механической прочностью. Он широко применяется в сэндвич-панелях стен, крыш и полов, особенно при необходимости обеспечения стабильной теплоизоляции на длительный срок [3].

Пенополистирол (EPS) является доступным и технологичным материалом с низкой плотностью и простотой обработки, однако он уступает XPS по механической прочности и влагостойкости, поэтому чаще применяется в облегченных конструкциях [3].

Материалы ограниченного и перспективного применения

Помимо основных, ранее перечисленных решений, в конструкции изотермических кузовов могут использоваться другие материалы в узких или вспомогательных функциях.

Пеностекло — жесткий материал с хорошей влагонепроницаемостью и прочностью, что делает его перспективным для отдельных участков конструкции с высокими механическими нагрузками. Однако его высокая плотность и стоимость ограничивают широкое применение [4].

Эковата — экологичный целлюлозный утеплитель с хорошими звукоизоляционными свойствами. Однако ее склонность к усадке и высокая гигроскопичность требуют надежной влагозащиты, что затрудняет применение в условиях динамической эксплуатации железнодорожного транспорта [4].

Вспененный полиэтилен, который представляет собой закрытоячеистый полимерный материал, обладает низким водопоглощением, высокой химической стойкостью и улучшенными вибродемпфирующими свойствами, что делает его полезным в качестве дополнительного теплоизоляционного и демпфирующего слоя в узлах ограждающих конструкций [8]. Однако его невысокая прочность на сжатие и ограниченная температурная стойкость не позволяют применять его в качестве основного теплоизоляционного слоя в изотермических вагонах.

Вакуумные изоляционные панели (ВИП) представляют собой высокотехнологичные элементы с крайне низким коэффициентом теплопроводности, что обеспечивает максимальную теплоизоляционную эффективность при минимальной толщине слоя [9]. Применение ВИП особенно актуально в условиях ограниченного объема или при необходимости повысить теплоизоляционные характеристики без увеличения массы и габаритов конструкции. Ограничениями являются высокая стоимость и чувствительность к механическим повреждениям (нарушение вакуума приводит к потере эффективности).

Свойства теплоизоляционных материалов (коэффициент теплопроводности и плотность), используемых в изотермическом подвижном составе, приведены в таблице.

ТАБЛИЦА. Свойства теплоизоляционных материалов

Материал	Параметр	
	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·град)	Плотность ρ , кг/м ³
Минеральная вата	0,030–0,048	30–200
Базальтовое волокно	0,044–0,050	40–180
Мипора	0,028–0,038	10–20
Пеноизол	0,030–0,040	8–18
Пенополиуретан (PUR)	0,019–0,030	30–45
Экструдированный пенополистирол (XPS)	0,032–0,042	28–45
Пенополистирол (EPS)	0,031–0,038	15–25
Пеностекло	0,040–0,080	120–200
Эковата	0,036–0,045	30–70
Вспененный полиэтилен	0,031–0,055	25–50
Вакуумные изоляционные панели	0,0015–0,008	150–250

Для обеспечения необходимого коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции изотермического вагона, равного $K = 0,4$ Вт/(м·град) для изотермического транспортного средства с усиленной изоляцией и $K = 0,7$ Вт/(м·град) с нормальной изоляцией, проведен расчет необходимых толщин [10]. Коэффициент теплопередачи определялся для кузова изотермического вагона, который моделировался в виде идеализированной многослойной стенки, включающей внутреннюю обшивку, теплоизоляционный слой и наружную обшивку.

Коэффициент теплопередачи для идеализированной многослойной стенки определяется на основе суммарного термического сопротивления:

$$K = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \alpha_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{вн}}$, $\alpha_{\text{н}}$ — сопротивления теплоотдаче с внутренней и наружной поверхностей ограждения, м²·град/Вт;

δ_i — толщина i -го слоя, м;

λ_i — коэффициент теплопроводности i -го слоя, Вт/(м·град);

n — число слоев конструкции.

Для приближенной оценки влияния неучтенных тепловых мостов и конструктивных элементов в упрощенном расчете вводится эмпирический поправочный коэффициент:

$$K_{\text{упр}} = \varphi \cdot K, \quad (2)$$

где φ — поправочный коэффициент, учитывающий конструктивную неоднородность ограждения, $\varphi = 1,5$.

Общий коэффициент ограждающей конструкции определялся по формуле:

$$K_{\text{об}} = \frac{\sum K \cdot F_{\text{ср}}}{F_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{ср}}$ — средняя площадь поверхности теплопередачи ограждающей конструкции, м^2 .

После подстановки данных табл. 1 были определены необходимые толщины для обеспечения коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции изотермического подвижного состава: $K = 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ и $K = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$. Результаты приведены на рис. 1 и 2.

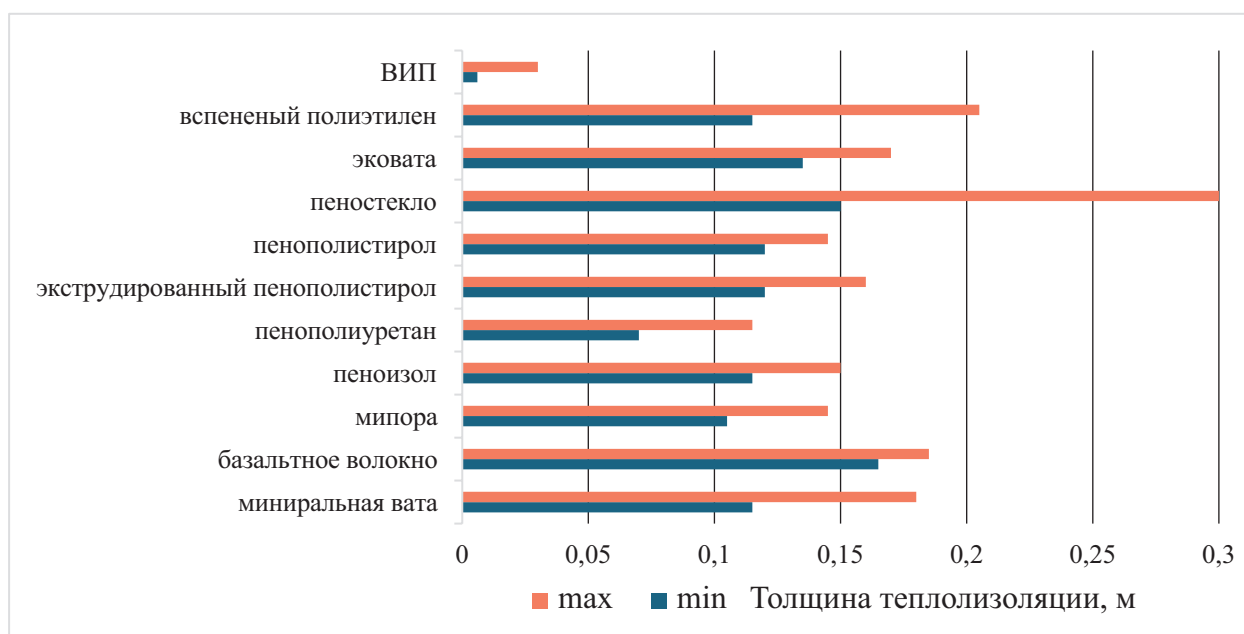


Рис. 1. Необходимая толщина изоляционного материала для обеспечения коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции ИПС с усиленной изоляцией:

$$K = 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$$

Из представленных диаграмм следует, что применение вакуумных изоляционных панелей по сравнению с основными традиционными изоляционными материалами (пенополиуретан, пенополистирол) позволяет значительно уменьшить минимальную необходимую толщину ограждающей конструкции изотермического

вагона. За счет сверхнизкого коэффициента теплопроводности вакуумных панелей (~ 5–10 раз ниже, чем у пенополиуретана) требуемая толщина теплоизоляции сокращается в несколько раз. Как следствие, внутренний полезный объем грузового помещения может быть увеличен до 10% при неизменных внешних габаритах вагона.

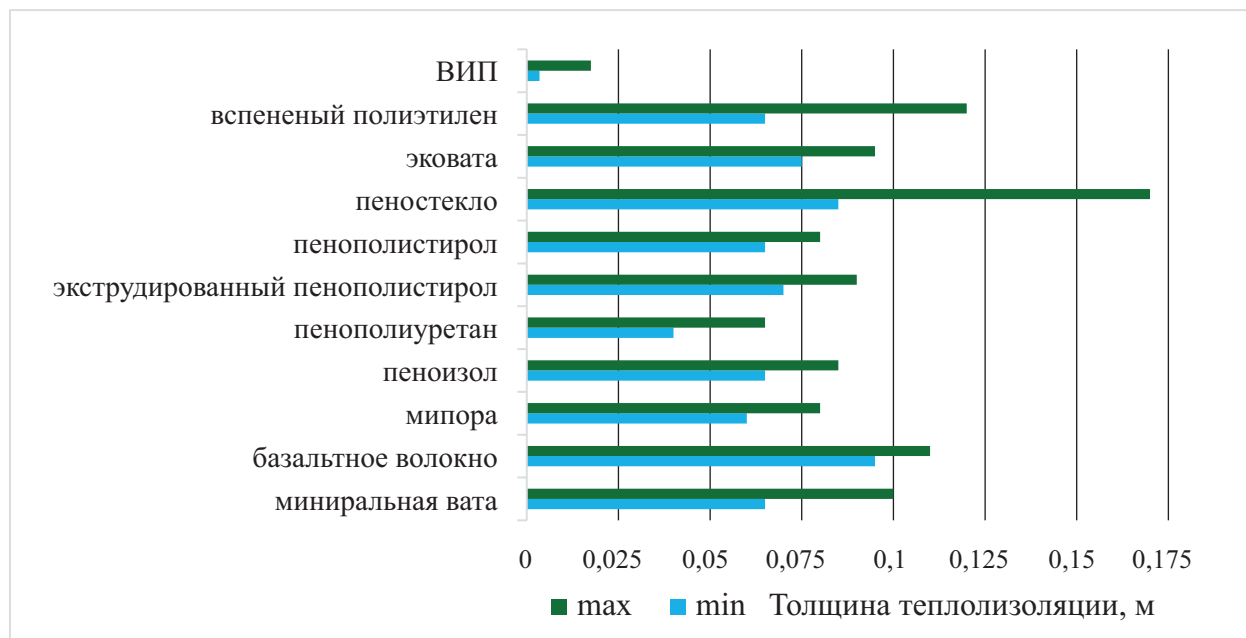


Рис. 2. Необходимая толщина изоляционного материала для обеспечения коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции ИПС с нормальной изоляцией:

$$K = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$$

Заключение

Проведенный в статье анализ теплоизоляционных материалов, применяемых в конструкции изотермического подвижного состава, позволяет сделать ряд обобщающих выводов:

1. *Оценка традиционных материалов.* Исторически наиболее доступные и широко распространенные решения (минеральная вата, мипора, пеноизол) сегодня заметно уступают современным полимерным материалам по совокупности эксплуатационных показателей. Основные недостатки этих материалов: сравнительно высокая теплопроводность, склонность к гигроскопии и накоплению влаги, что приводит к резкому снижению термоизолирующих свойств, а также подверженность усадке и слеживанию в процессе длительной эксплуатации под воздействием вибраций. Все это требует увеличения толщины изоляционного слоя, что неизбежно сокращает полезный объем грузового помещения.

2. *Современные базовые материалы.* На сегодняшний день пенополиуретан (в том числе жесткий вспененный) и экструдированный пенополистирол являются основными материалами для теплоизоляции стен, крыш и полов изотермических вагонов. Их широкое применение обусловлено удачным сочетанием ключевых

свойств: низкая теплопроводность, достаточная влагостойкость, а также технологичность монтажа и относительно невысокая стоимость. Эти материалы обеспечивают стабильную термозащиту в течение всего нормативного срока службы вагона при соблюдении правил эксплуатации.

3. *Материалы ограниченного применения.* Пеностекло, эковата, вспененный полиэтилен и подобные им изоляторы находят свое место скорее в узловых конструкциях и вспомогательных функциях, чем в качестве основного сплошного теплоизоляционного слоя. Пеностекло, обладая высокой жесткостью и нулевым водопоглощением, может эффективно применяться в зонах повышенных механических нагрузок и в местах, где требуется абсолютная несжимаемость. Эковата благодаря сыпучести удобна для заполнения труднодоступных полостей и сложных геометрических форм. Вспененный полиэтилен используется как демпфирующая и пароизоляционная подложка. Однако ни один из этих материалов самостоятельно не способен обеспечить требуемое термическое сопротивление ограждающих конструкций вагона в полном объеме.

4. *Перспективное направление.* Наиболее перспективным направлением развития теплоизоляции для изотермического подвижного состава являются вакуумные изоляционные панели (ВИП). Они обеспечивают максимальные термоизоляционные характеристики — эффективная теплопроводность составляет от 0,0015 до 0,008 Вт/(м·К), что примерно в 5–10 раз ниже, чем у пенополиуретана. Применение ВИП позволяет либо при той же толщине изоляции значительно повысить термостойкость вагона, либо при сохранении требуемого термического сопротивления уменьшить толщину стенок и увеличить полезный объем грузового помещения до 10%.

Вместе с тем широкое внедрение вакуумных панелей сдерживается рядом нерешенных проблем. Это прежде всего высокая стоимость как самих панелей, так и их замены в случае повреждения. Кроме того, остаются открытыми вопросы долговременной герметичности оболочки и сохранения глубокого вакуума внутри панели в условиях реальной эксплуатации (вибрации, удары, циклические перепады температур, возможные механические повреждения). Требуются дальнейшие исследования и технологические разработки, направленные на повышение ударопрочности, снижение стоимости и обеспечение сохранения вакуумных свойств в течение всего жизненного цикла вагона (не менее 15–20 лет).

Таким образом, современный уровень развития теплоизоляционных материалов позволяет проектировать изотермические вагоны с высокими эксплуатационными характеристиками. Выбор конкретного материала должен определяться технико-экономическим обоснованием с учетом типа перевозимых грузов, климатических условий эксплуатации и требуемого срока службы подвижного состава. При этом наиболее интенсивное развитие в ближайшие годы ожидается именно в области вакуумных изоляционных технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахматов Х. А. Оценка тепловых ограждений кузова изотермического подвижного состава // Молодой ученый, 2022. № 24 (419). С. 118–121. EDN MDWUAS
2. Бороненко Ю. П., Абдуллаев Б. А. Экспериментальные исследования новых конструктивных решений ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2020. Т. 17, № 4. С. 498–513. DOI 10.20295/1815-588X-2020-4-498-513. EDN PBCJSF
3. Research and Application Progress of Insulation Materials in Cold Chain Logistics / Y. Dong [et al.] // Academic Journal of Science and Technology. 2023. Vol. 8, no. 2. Pp. 104–110. DOI: 10.54097/ajst.v8i2.15049
4. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АСВ, 2006. 256 с.
5. Селиванов Ю. Т. Карбамидно-формальдегидные пенопласты (пеноизол): свойства и применение // Строительные материалы. 2012. № 5. С. 18–22.
6. Cui G., Wang X. Engineering Application and Study on Polyurethane-Corrugated Steel Plate Insulation Lining of Existing Railway Tunnel in Seasonal Frozen Area // Science Progress. 2021. Vol. 104, no. 1. Pp. 1–18. DOI: 10.1177/0036850420987043
7. Буриков С. В., Цыганская Л. В. Выбор технических решений, ограждающих конструкции вагонов-термосов при проектировании // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (99). С. 64–71. DOI: 10.46973/0201-727X_2025_3_64. EDN FAPXMX
8. Горелик П. И., Золотова Ю. С. Современные теплоизоляционные материалы и особенности их применения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 3 (18). С. 93–103.
9. Verma S., Singh H. Vacuum Insulation in Cold Chain Equipment: A Review // Energy Procedia. 2019. Vol. 161. Pp. 232–241. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.082
10. Соглашение о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС). 2024. URL: https://unece.org/transport/publications/agreement-international-carriage_perishable-foodstuffs-and-special-6

Дата поступления: 27.02.2026

Решение о публикации: 29.04.2026

Контактная информация:

БУРИКОВ Сергей Витальевич — аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», начальник отдела прочностных расчетов; b.s.v.3479@gmail.com

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валерьевна — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», заместитель генерального директора — главный конструктор; tcyganskaya@gmail.com

Thermal Insulation Materials in the Design of Isothermal Rolling Stock

S. V. Burikov^{1,2}, L. V. Tsyganskaya^{1,2}

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

² JSC "Scientific and Innovation Center "Vagon", 22m Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Burikov S. V., Tsyganskaya L. V. Thermal Insulation Materials in the Design of Isothermal Rolling Stock // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 43–52. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-43-52 (In Russian)

Abstract

The article provides a review of thermal insulation materials and a calculated assessment of the required thickness of thermal insulation used in the design of isothermal rolling stock intended for the transportation of perishable goods while maintaining a specified temperature regime. **Objective:** systematization and comparative analysis of thermal insulation materials used in the enclosing structures of isothermal wagons, as well as identification of the most effective solutions for ensuring a stable temperature regime during the transportation of perishable goods under various climatic and operational conditions. **Results:** the main types of thermal insulation are analyzed in terms of their thermal conductivity coefficient, physical and mechanical properties, moisture resistance, fire resistance, and operational durability. A comparative description of traditional and modern materials (polyurethane foam, polystyrene foams, mineral wool, foam glass, vacuum insulation panels, etc.) is provided, and their advantages, disadvantages, and feasibility of use in the enclosing structures of the wagon body are determined. It is established that polyurethane foam and extruded polystyrene foam are the main materials for thermal insulation of walls, roofs, and floors of isothermal wagons due to the optimal combination of low thermal conductivity, mechanical strength, and moisture resistance. It is shown that the use of vacuum insulation panels makes it possible to significantly reduce the thickness of enclosing structures and increase the useful volume of the cargo compartment by up to 10 % while maintaining the external dimensions of the wagon. **Practical significance:** the developed recommendations for the selection of thermal insulation materials can be used in the design of new and modernization of existing isothermal wagons to improve the efficiency of perishable goods transportation. The obtained results make it possible to make informed choices of insulation taking into account the balance between thermal efficiency, durability, and economic costs, which helps to reduce losses of transported products and extend the service life of rolling stock.

Keywords: isothermal rolling stock, refrigerated car, thermos car, thermal insulation materials, thermal conductivity coefficient, and body thermal insulation

References

1. Rakhmatov Kh.A. Otsenka teplovykh ograzhdenij kuzova izotermicheskogo podvizhnogo sostava [Assessment of Thermal Fences of the Body of the Isothermal Rolling Stock], *Young Scientist*, 2022, no. 24 (419), pp. 118–121. EDN MDWUAS (In Russian)
2. Boronenko Yu. P., Abdullaev B. A. Eksperimental'nye issledovaniya novykh konstruktivnykh reshenij ograzhdeniya kuzovov refrizheratornykh vagonov i kontejnerov [Experimental Research of New Design Solutions for the Fencing of Refrigerated Carriages and Containers], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 498–513. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-498-513. EDN PBCJSF (In Russian)

3. Dong Y., et al. Research and Application Progress of Insulation Materials in Cold Chain Logistics // *Academic Journal of Science and Technology*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 104–110. DOI: 10.54097/ajst.v8i2.15049
4. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastej zdanij [Construction Heat Engineering of Enclosing Parts of Buildings], Moscow, IASV, 2006, 256 p. (In Russian)
5. Selivanov Yu. T. Karbamidno-formal'degidnye penoplasty (penoizol): svoystva i primeneniye [Urea-Formaldehyde Foams (Penoizol): Properties and Application], *Construction Materials*, 2012, no. 5, pp. 18–22. (In Russian)
6. Cui G., Wang X. Engineering Application and Study on Polyurethane-Corrupted Steel Plate Insulation Lining of Existing Railway Tunnel in Seasonal Frozen Area, *Science Progress*, 2021, vol. 104, no. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1177/0036850420987043
7. Burikov S. V., Tsyganskaya L. V. Vybor tekhnicheskikh reshenij, ograzhdayushchikh konstruksii vagonov-termosov pri proektirovanii [The Choice of Technical Solutions Enclosing the Structures of Thermos Wagons During Design], *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport]*, 2025, no. 3 (99), pp. 64–71. DOI: 10.46973/0201-727X_2025_3_64. EDN FAPXMX (In Russian)
8. Gorelik P. I., Zolotova Yu. S. Sovremennye teploizolyatsionnye materialy i osobennosti ikh primeneniya [Modern Thermal Insulation Materials and Their Application Features], *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanij i sooruzhenij [Construction of Unique Buildings and Structures]*, 2014, no. 3 (18), pp. 93–103. (In Russian)
9. Verma S., Singh H. Vacuum Insulation in Cold Chain Equipment: A Review, *Energy Procedia*, 2019, vol. 161, pp. 232–241. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.082
10. Soglashenie o mezhdunarodnykh perevozkakh skoroportyashchikhsya pishchevykh produktov i o spetsial'nykh transportnykh sredstvakh, prednaznachennykh dlya etikh perevozok (SPS) [Agreement on International Carriage of Perishable Food Products and on Special Vehicles for Such Carriage (CFR)], 2024. URL: <https://unece.org/transport/publications/agreement-international-carriage-perishable-foodstuffs-and-special-6> (In Russian)

Received: February 27, 2026

Accepted: April 29, 2026

Author's information:

Sergey V. BURIKOV — Postgraduate Student of the Department “Carriages and Carriage Maintenance”, Head of the Department of Strength Calculations; b.s.v.3479@gmail.com

Lyudmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Carriages and Carriage Maintenance”, Deputy General Director — Chief Designer; tcyganskaya@gmail.com

УДК 004.896

Повышение безопасности движения трамваев за счет применения системы обеспечения активной безопасности и помощи водителю

А. А. Воробьев, А. М. Перепеченов, В. Г. Кондратенко, Н. К. Мигулин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Воробьев А. А., Перепеченов А. М., Кондратенко В. Г., Мигулин Н. К. Повышение безопасности движения трамваев за счет применения системы активной безопасности и помощи водителю // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 53–64. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-53-64

Аннотация

Цель: в статье исследована целесообразность применения системы обеспечения активной безопасности и помощи водителю (АБПВ) на городском трамвае. **Методы:** анализ материалов предприятия-изготовителя и опыта применения перевозчиком системы Cognitive Tram Pilot на подвижном составе трамвая в Санкт-Петербурге. **Результаты:** применение данной системы уменьшило число сходов трамваев, падения пассажиров, наездов на пешеходов и ДТП с автомобилями. **Практическая значимость:** можно рекомендовать установку данной системы на весь подвижной состав ГУП «Горэлектротранс» для повышения безопасности движения и эффективности перевозок, а в перспективе для перехода к беспилотной работе трамваев.

Ключевые слова: рост городов, увеличение заторов на дорогах, ухудшение экологии, трамвайный транспорт, система активной безопасности и помощи водителю, предотвращение ДТП, повышение безопасности движения и эффективности, беспилотный трамвай

Комфортная городская среда — неперемное условие успешного развития любого большого города. Общественный транспорт является неотъемлемым важным элементом городской инфраструктуры, которым ежедневно пользуется бóльшая часть жителей. Быстрый рост городов усиливает проблему автомобильных пробок на дорогах, ухудшает экологию, и только активное применение общественного транспорта может стать эффективным способом передвижения.

Трамвай занимает важную ступень в системе городского наземного транспорта [1–4]. Например, новая пятисекционная модель 71-952, построенная в 2025 году российской компанией «Транспортные системы», имеет длину 37,5 м, ширину 2,5 м и вместимость до 400 чел. при наполнении 8 чел. на 1 м². Вагон предназначен для челночного движения, имеет по семь дверей с каждой стороны, оснащен четырьмя тележками: крайние тележки выполнены поворотными, а средние — неповоротными (рис. 1) [5].

Самый длинный в мире трамвай модели Škoda ForCity Smart 38T был построен в 2024 году компанией Škoda Group для линий Рейн-Неккар, которые соединяют

три города: Мангейм, Людвигсхафен и Гейдельберг в Германии. Он представляет собой шестисекционный двухсторонний трамвай, имеет длину 58,61 м, ширину 2,4 м и предназначен для работы на колее 1000 мм. В Китае все большее применение находят шинные безрельсовые трамваи [6, 7].



Рис. 1. Российский пятизвенный двухсторонний трамвайный вагон модели 71-952 «Воевода» длиной 37,5 м и вместимостью до 400 чел. [5].

Источник: ПК «Транспортные системы»

Возникновение любой аварии на путях может привести к получению травм пассажирами, движение на маршруте временно приостанавливается, возникают заторы из вагонов и автомобилей. Это приводит к тому, что трамвай теряет свою привлекательность и пассажиры будут предпочитать для поездок другие виды транспорта (автобус, метрополитен). Компания-перевозчик несет при этом убытки, как связанные с необходимостью ремонта подвижного состава, так и от потери пассажиров.

Сбербанк и Cognitive Technologies в 2019 году основали компанию Cognitive Pilot, которая специализируется на создании беспилотных систем для транспорта, аграрного сектора, а также технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта. В настоящее время российская компания Cognitive Pilot входит в список ведущих мировых компаний — разработчиков искусственного интеллекта для автономного транспорта и поставляет свою продукцию не только в Россию, но и еще в 12 стран мира [8].

Технология Cognitive Navigation представляет собой систему автономного управления беспилотными транспортными средствами, разработанную этой компанией. Термин «когнитивный» включает в себя такие факторы, как память, внимание, восприятие, принятие решений, позволяющих человеку взаимодействовать с окружающей средой и адаптироваться к ней.

Важнейшие аспекты технологии Cognitive Navigation:

- искусственный интеллект (ИИ) и компьютерное зрение для видения и понимания окружающего пространства, что позволяет выполнять точные навигационные задачи;
- автономное управление, включающее в себя системы автопилотирования рельсового транспорта (локомотив, трамвай);
- технология точной навигации, которая позволяет транспортному средству перемещаться с сантиметровой точностью, даже в условиях отсутствия интернета и GPS (навигационной спутниковой системы);

- распознавание объектов, включая области, которые трудно различить человеческим глазом;
- полная автономность работы транспортного средства;
- инновационные методы обучения искусственного интеллекта, позволяющие решать одновременно несколько задач, что ведет к существенному уменьшению продолжительности обработки информации и экономит вычислительные ресурсы;
- устойчивость и независимость, заключающаяся в способности работать в условиях отсутствия сигналов спутниковых навигационных систем;
- импортозамещение, которое предполагает, что на основе технологий Cognitive Pilot в России будут полностью замещены зарубежные аналоги.

Наиболее сложная задача при организации беспилотного сообщения транспортного средства в городе заключается в установлении его точного местоположения, что служит важнейшим условием обеспечения безопасного движения. Как правило, для этого используется сигнал GPS, но в условиях в города, при наличии плотной инфраструктуры (зданий, парков, мостов и оборонных предприятий, осуществляющих глушение GPS-сигнала) использование данной технологии не представляется возможным.

Основными элементами системы Cognitive Navigation являются инерциальный модуль, который представляет собой гироскопическое устройство, служащее для ориентации трамвая в пространстве, и одометрический датчик, определяющий путь, пройденный трамваем по результатам замера угла поворота колеса и карте рельсовых путей города. Карта включает все маршруты движения трамвая, стрелочные узлы, схемы территорий трамвайных парков и т. д.

Одометрическая система является навигационной системой, использующей информацию о пройденном расстоянии и направлении движения объекта для определения его местоположения и маршрута. Она включает в себя механический датчик пути, курсовую систему, вычислительное устройство и курсовой указатель на планшете.

Механический датчик линейного перемещения располагается на подвижном составе, а его подвижная часть соединена с осью колесной пары и передает данные о его движении в вычислительное устройство. Использование данного устройства позволяет точно определять продольное перемещение трамвайного вагона и снижает погрешность, которая обуславливается профилем рельсового пути [9–14].

Российской компанией Cognitive Pilot разработана система активной безопасности и помощи водителю (АБПВ) Cognitive Tram Pilot, предназначенная для рельсового городского транспорта, которая базируется на системе навигации Cognitive Navigation, разработанной на основе искусственного интеллекта, компьютерного зрения и способной работать в случае отсутствия сигналов GPS [8].

Данная система, устанавливаемая на трамвай, состоит из трех основных элементов:

- блока видеокамер (рис. 2);
- радара;
- вычислительного блока.



Рис. 2. Кабина трамвая, оснащенная системой Cognitive Tram Pilot: два блока видеокамер расположены под софитами [15]. Источник: Cognitive Tram Pilot

Действие системы АБПВ условно можно разделить на три основные функции: обнаружение препятствий, распознавание сигналов светофоров и соблюдение разрешенной скорости движения по маршруту.

Для обеспечения автономного управления трамваем, как и любым другим городским транспортом, критически важно знать его точное местоположение. Эта информация необходима для корректной работы нескольких ключевых компонентов системы:

1. Управление проездом перекрестков. Определение сигналов светофора представляет собой непростую задачу, особенно в условиях плохой видимости (ночью, в непогоду), когда легко спутать «свой» светофор с встречным или рекламными огнями. Система должна точно распознавать сигналы светофоров, сопоставлять их с информацией на карте и принимать решение о возможности безопасного проезда перекрестка.

2. Предотвращение столкновений. При необходимости экстренного торможения система должна точно рассчитать параметры замедления, чтобы обеспечить максимальный комфорт для пассажиров.

3. Контроль скорости. Система контролирует скоростной режим движения трамвая с учетом существующих ограничений скорости на маршруте следования.

Перемещение трамвая отслеживается с сантиметровой точностью, хотя для большинства задач достаточно погрешности 0,5 м. В случае потери сигнала GPS навигация осуществляется с помощью данных от одометра (датчика пройденного пути), инерциального блока и карты рельсовых путей.

Технология контроля погрешностей перемещения позволяет проводить их учет индивидуально для каждой единицы подвижного состава; отслеживать показания и ошибки датчиков в случае изменения (уменьшения) радиуса катания колеса после механической обработки обода колеса или эксплуатационного износа.

Подобно другим системам автопилотирования от Cognitive Pilot, Cognitive Tram Pilot использует антропоморфную модель искусственного интеллекта для точного определения местоположения трамвая. Эта система анализирует данные с камеры, сравнивает их с картой маршрута и при обнаружении расхождений корректирует координаты, опираясь на результаты видеоанализа (рис. 3).



Рис. 3. Интерфейс системы компьютерного зрения [8]. Источник: Cognitive Tram Pilot

Для функционирования системы навигации не требуется дополнительная инфраструктура, такая как Wi-Fi-маяки или RFID-метки. Это значительно упрощает внедрение и снижает затраты на роботизацию городских трамваев.

Система становится незаменимым помощником водителя как в ситуациях, связанных с риском ДТП, так и при обычном движении по маршруту, помогая оптимально проходить сложные участки.

Cognitive Tram Pilot также контролирует состояние водителя и окружающую обстановку, что способствует предотвращению аварий и других опасных ситуаций. Система использует нейронные сети, которые, подобно человеку, требуют обучения для эффективной работы.

По утверждению экспертов, основными преимуществами трамваев, оборудованных системой автопилота, являются [15]:

- исключение влияния человеческого фактора, который может проявляться в отвлечении внимания водителя при разговоре по мобильному телефону, засыпании при движении, возникновении стрессовых ситуаций, при этом система функционирует в режиме плавного, неторопливого хода, что обеспечивает поддержание оптимального графика движения и позволяет эффективно адаптироваться к изменяющимся дорожным условиям;

- повышение безопасности движения трамвая на 20–25 %;

- увеличение безопасности и комфорта для пассажиров;

- продление срока службы рельсовой инфраструктуры на 30–40 % за счет применения контроля скоростного режима;

- постоянный мониторинг инфраструктуры города — определение проблемных зон, повреждений дорожного полотна, знаков, элементов освещения и др.;

- возможность сделать движение трамваев более равномерным, уменьшить заторы и сократить время ожидания для пассажиров;

- обеспечение безопасного следования по маршруту при любой погоде, в сложных условиях движения, включая темное время суток, при выпадении осадков в любое время года, а также в случае ослепления светом встречного транспорта;

- непрерывное повышение возможностей искусственного интеллекта вплоть до способности беспилотного движения. Система постепенно принимает на себя все больше функций по управлению подвижным составом, причем за водителем остается возможность контроля и вмешательства в процесс управления;

- использование отечественных компонентов более чем на 80 %.

К недостаткам данной системы следует отнести:

- затраты на ее приобретение, установку и обслуживание;

- резкое торможение в случае остановки;

- необоснованные ложные срабатывания;

- недостаточно четкое восприятие сигналов светофоров;

- необоснованное снижение скорости движения на маршруте;

- отсутствие соответствующей для ее работы инфраструктуры и нормативно-правовой базы.

Петербург получил новые трамваи от ПК «Транспортные системы», в которых особое внимание уделено безопасности и комфорту пассажиров. Современные вагоны оснащены передовым оборудованием, в том числе системой Cognitive Tram Pilot (рис. 4). Эта интеллектуальная система помогает водителю распознавать пешеходов, сигналы светофоров, другие транспортные средства и дорожные знаки, анализирует дорожную обстановку и предупреждает о возможных опасностях. Умный трамвай также контролирует скорость, предотвращает отвлечение

водителя и следит за его состоянием, не допуская засыпания. Кроме того, предусмотрены функции дистанционного управления стрелками и обеспечения приоритетного проезда.



Рис. 4. Кабина водителя трамвая модели 71-932 «Невский», оснащенная системой обеспечения активной безопасности и помощи водителю Cognitive Tram Pilot [15].

Источник: Cognitive Tram Pilot

Салон вагона имеет панорамное остекление, установлены специальные кронштейны для велосипедов, кнопка вызова водителя, откидная аппарель для доступа в салон пассажиров с ограниченными возможностями. Также предусмотрены USB-разъемы и мультимедийные информационные комплексы. Для водителя создано эргономичное кресло, обновлен пульт, есть датчик дождя, система кругового обзора вагона и связь с диспетчером.

Решение о проведении испытаний беспилотных технологий на различных видах городского пассажирского транспорта (включая трамвай) было принято Министерством экономического развития России в форме постановления об ЭПР (экспериментальном правовом режиме). В нем предусмотрено проведение экспериментов в Москве и Санкт-Петербурге. Инициатором принятия данного документа явился Московский метрополитен.

Экспериментальный проект по внедрению беспилотных трамваев включает в себя несколько ключевых направлений. Прежде всего разработают и подготовят программу обучения для водителей, которые будут участвовать в испытаниях, а также для специалистов, ответственных за диагностику оборудования в процессе тестирования. Параллельно будут проводиться мероприятия, направленные на повышение уровня безопасности эксплуатации подвижного состава. Основной

акцент в рамках данного эксперимента будет сделан на обеспечении безопасности движения. Беспилотные трамваи будут курсировать по маршруту под постоянным надзором водителя-оператора.

На основе существующей нормативной базы ЭПР планируется создать правовую основу для функционирования общественного транспорта, управляемого без участия человека. Этот экспериментальный режим будет действовать в течение трех лет.

В процессе проведения испытаний каждый трамвай должен наездить до 3000 км или наработать около 150 часов, только после этого они будут допущены для работы в беспилотном режиме, но все же в присутствии водителя-оператора. Начиная с 2022 года в Санкт-Петербурге предприятие «Городской электрический транспорт» вплотную занимается беспилотными технологиями. В настоящее время более 330 трамваев оснащены системой активной безопасности и помощи водителю Cognitive Tram Pilot, которая хорошо зарекомендовала себя на городском трамвае.

Так, например, в июне 2024 года трамвайный вагон, оборудованный данной системой и способный работать в беспилотном режиме, принимал участие наравне с водителями в профессиональном конкурсе водителей трамвая в Санкт-Петербурге. Результаты работы по точности остановки перед светофорами, стоп-линиями и по времени прохождения маршрута оказались наравне с лучшими сотрудниками предприятия.

В Санкт-Петербурге на 2026 год намечено проведение эксперимента по запуску беспилотного трамвая. Договоренность об этом была достигнута еще в 2023 году между предприятием СПб ГУП «Горэлектротранс» и компаниями Cognitive Pilot и «Транспортные системы».

В Москве беспилотный трамвай предполагалось пустить в эксплуатацию до конца 2025 года.

Следует принимать во внимание, что целый ряд экспертов сомневается в том, что в настоящее время полностью беспилотный трамвай вообще необходим. Полностью беспилотное движение трамвая будет осуществлено в том случае, когда все стороны, принимающие участие в проекте, убедятся в надежности и безопасности его работы, а также в случае наличия необходимой инфраструктуры и законодательного обеспечения.

Эксперимент позволит разработать нормативную правовую модель регулирования беспилотного общественного транспорта. Сейчас проводятся доводка и отладка системы активной помощи водителю, которая непрерывно совершенствуется и обучается за счет замечаний, выявленных водителями. Специалисты анализируют и устраняют все возникающие недостатки.

В перспективе предполагается установка системы активной безопасности и помощи водителю на весь парк новых трамваев в городе, которая является также

и беспилотной системой управления. Применение данной системы позволит в первую очередь повысить безопасность и эффективность работы городского трамвая в Санкт-Петербурге.

Список источников

1. Эволюция конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге / А. А. Воробьев [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2020. Т. 17, № 1. С. 62–70.
2. Быльцева В. Д., Пакулина Е. В. Совершенствование конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте железнодорожного подвижного состава: сборник трудов Национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. СПб., 2020. С. 44–50.
3. Воробьев А. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г. Анализ современных технических решений, применяемых в конструкциях низковольтных трамвайных вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18, № 1. С. 1–15.
4. Михалицын А. А., Будюкин А. М. Анализ конструкций современных низковольтных трамвайных вагонов // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте рельсового подвижного состава: сборник трудов Национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых / под ред. А. А. Воробьева. СПб., 2023. С. 110–117.
5. Производство городского электрического транспорта ООО «ПК «Транспортные системы». URL: <https://pk-ts.org> (дата обращения: 26.11.2025).
6. Перспективы применения автономного шинного трамвая Phileas с технологией магнито-электронного наведения / А. А. Воробьев [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, № 1. С. 252–262.
7. Целесообразность применения цифровых трамваев на шинах в городах России / А. М. Будюкин [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. № 1. С. 84–96.
8. Когнитивный пилот трамвая. URL: <https://cognitivepilot.com/products/cognitive-tram-pilot/> (дата обращения: 26.11.2025).
9. Липатов А. Г., Белова Е. Ю. Эффективность эксплуатации транспортных средств с использованием искусственного интеллекта // Инновации и инвестиции. 2023. № 6. С. 165–167.
10. Gonzalez M., Retana J. Technological Innovations in Autonomous Trains: A Review // Journal of Rail Transportation Planning & Management. 2022. No. 45. Pp. 80–95.
11. Кромцов Е. Е. Системы управления движением на основе искусственного интеллекта // Техническая механика. 2022. № 7 (4). С. 32–38.
12. Горбачев Б. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г. Развитие беспилотного управления поездами на подвижном составе ОАО «РЖД» // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте рельсового подвижного состава: сборник трудов Национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых / под ред. А. А. Воробьева. СПб., 2023. С. 101–106.

13. Искусственный интеллект и безопасность управления транспортом / А. Н. Цыбульский [и др.] // Системы автоматизированного проектирования на транспорте: материалы X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб., 2023. С. 281–293.

14. Обзор развития информационных систем управления эксплуатацией техники / В. Г. Щепин [и др.] // Современные технологии, применяемые при обслуживании и ремонте автомобилей: сборник трудов VIII Национальной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. СПб., 2024. С. 224–229.

15. Горэлектротранс рассказал об обучении умных трамваев на форуме «ИТ-Диалог». URL: <https://electrotrans.spb.ru/> (дата обращения: 26.11.2025).

Дата поступления: 24.04.2026

Решение о публикации: 30.05.2026

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — доктор техн. наук, профессор; nttk@pgups.ru

ПЕРЕПЕЧЕНОВ Александр Маркович — кандидат техн. наук, доцент; nttk@pgups.ru

КОНДРАТЕНКО Владимир Григорьевич — кандидат техн. наук, доцент; nttk@pgups.ru

МИГУЛИН Никита Константинович — аспирант; migulinnik@rambler.ru

Improving Tram Safety Through the Use of Active Safety and Driver Assistance Systems

A. A. Vorob'ev, A. M. Perepechenov, V. G. Kondratenko, N. K. Migulin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Vorob'ev A. A., Perepechenov A. M., Kondratenko V. G., Migulin N. K. Improving Tram Safety Through the Use of Active Safety and Driver Assistance Systems // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 53–64. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-53-64 (In Russian)

Abstract

Objective: this article examines the feasibility of implementing an active safety and driver assistance system (ASDS) on a city tram. **Methods:** analysis of manufacturer data and the operator's experience using the Cognitive TramPilot system on tram rolling stock in St. Petersburg. **Results:** implementation of this system has reduced the number of tram derailments, passenger falls, pedestrian collisions, and vehicle-vehicle accidents. **Practical significance:** installation of this system on all Gorelektrotrans rolling stock can be recommended to improve traffic safety and transportation efficiency, and, ultimately, to facilitate the transition to driverless trams.

Keywords: urban growth, increasing traffic congestion, environmental degradation, tram transport, active safety and driver assistance systems, accident prevention, improving traffic safety and efficiency, driverless tram

References

1. Vorob'ev A. A., et al. Evolyutsiya konstruktсии podvizhnogo sostava legkorel'sovogo transporta v Sankt-Peterburge [Evolution of the Design of Light Rail Rolling Stock in St. Petersburg], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 62–70. (In Russian)
2. Byl'tseva V. D., Pakulina E. V., Budyukin A. M. Sovershenstvovanie konstruktсии podvizhnogo sostava legkorel'sovogo transporta v Sankt-Peterburge [Improving the Design of Light Rail Rolling Stock in St. Petersburg], *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Progressive Technologies Used in the Repair of Railway Rolling Stock: Collection of Works of the National Scientific and Technical Conference of Students, Master's Students, Graduate Students and Young Scientists]*, 2020, pp. 44–50. (In Russian)
3. Vorob'ev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Analiz sovremennykh tekhnicheskikh reshenij, primenyaemykh v konstruktсийakh nizkopol'nykh tramvajnykh vagonov [Analysis of Modern Technical Solutions Used in the Designs of Low-Floor Tram Cars], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 1–15. (In Russian)
4. Mikhalitsyn A. A., Budyukin A. M. Analiz konstruktсий sovremennykh nizkopol'nykh tramvajnykh vagonov [Analysis of the Designs of Modern Low-Floor Tram Cars], *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte rel'sovogo podvizhnogo sostava [Progressive Technologies Used in the Repair of Rail Rolling Stock: Collection of Works of the National Scientific and Technical Conference of Students, Master's Students, Postgraduates and Young Scientists]*, ed. by A. A. Vorob'ev, Saint Petersburg, 2023, pp. 110–117. (In Russian)
5. Proizvodstvo gorodskogo elektricheskogo transporta OOO "PK "Transportnye sistemy" [Production of Urban Electric Transport by PC Transport Systems LLC]. URL: <https://pk-ts.org> (accessed November 26, 2025). (In Russian)
6. Vorob'ev A. A., et al. Perspektivy primeneniya avtonomnogo shinnogo tramvaya Phileas s tekhnologiej magnito-elektronного navedeniya [Prospects for the Application of the Autonomous Bus Tram Phileas With Magneto-Electronic Guidance Technology], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 252–262. (In Russian)
7. Budyukin A. M., et al. Tselesoobraznost' primeneniya tsifrovykh tramvaev na shinakh v gorodakh Rossii [Feasibility of Using Digital Bus Trams in Russian Cities], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2024, no. 1, pp. 84–96. (In Russian)
8. Kognitivnyj pilot tramvaya [Cognitive Tram Pilot]. URL: <https://cognitivepilot.com/products/cognitive-tram-pilot/> (accessed: November 26, 2025). (In Russian)
9. Lipatov A. G., Belova E. Yu. Effektivnost' ekspluatatsii transportnykh sredstv s ispol'zovaniem iskusstvennogo intellekta [Efficiency of Operation of Vehicles Using Artificial Intelligence], *Innovatsii i investitsii [Innovations and Investments]*, 2023, no. 6, pp. 165–167. (In Russian)
10. Gonzalez, M., Retana, J. Technological Innovations in Autonomous Trains: A Review, *Journal of Rail Transportation Planning & Management*, 2022, no. 45, pp. 80–95.

11. Kromtsov E. E. Sistemy upravleniya dvizheniem na osnove iskusstvennogo intellekta [Traffic Control Systems Based on Artificial Intelligence], *Tekhnicheskaya mekhanika [Journal of Technical Mechanics]*, 2022, no. 7 (4), pp. 32–38. (In Russian)

12. Gorbachev B. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Razvitie bespilotnogo upravleniya poezdami na podvizhnom sostave OAO “RZhD” [Development of Unmanned Train Control on the Rolling Stock of JSC Russian Railways], *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte rel'sovogo podvizhnogo sostava: sbornik trudov Natsional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh [Progressive Technologies Used in the Repair of Rail Rolling Stock: Collection of Papers of the National Scientific and Technical Conference of Students, Master's Students, Postgraduate Students and Young Scientists]*, ed. by A. A. Vorob'ev, Saint Petersburg, 2023, pp. 101–106. (In Russian)

13. Tsybul'sky A. N., et al. Iskusstvennyj intellekt i bezopasnost' upravleniya transportom [Artificial Intelligence and Transport Control Safety], *Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya na transporte: materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Computer-Aided Design Systems in Transport: Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists]*, Saint Petersburg, 2023, pp. 281–293. (In Russian)

14. Shchepin V. G., et al. Obzor razvitiya informatsionnykh sistem upravleniya ekspluatatsiej tekhniki [Review of the Development of Information Systems for Equipment Operation Management], *Sovremennye tekhnologii, primenyaemye pri obsluzhivanii i remonte avtomobilej: sbornik trudov VIII Natsional'noj mezhvuzovskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh [Modern Technologies Used in Vehicle Maintenance and Repair: Collection of Papers of the VIII National Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students, Master's Students, Postgraduates, and Young Scientists]*, Saint Petersburg, 2024, pp. 224–229. (In Russian)

15. Gorelektrotrans rasskazal ob obuchenii umnykh tramvaev na Forume “IT-Dialog” [Gorelectrotrans Spoke about the Training of Smart Trams at the IT Dialogue Forum]. URL: <https://electrotrans.spb.ru/> (accessed: November 26, 2025). (In Russian)

Received: April 25, 2026

Accepted: May 30, 2026

Author's information:

Alexander A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; nttk@pgups.ru

Alexander M. PEREPECHENOV — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru

Vladimir G. KONDRATENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru

Nikita K. MIGULIN — Postgraduate Student; migulinnik@rambler.ru;

УДК 621.316.925

Выявление дуговых процессов в контактной сети городского электротранспорта методами осциллографического мониторинга и спектральной обработки

**А. В. Агунов¹, А. В. Щербань², Д. Д. Архипов², А. А. Кузнецов³,
К. Д. Симоненко¹**

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² СПб ГУП «Горэлектротранс», Россия, 196105, Санкт-Петербург, Сызранская ул., 15.

³ ООО «Институт проблем энергетики», Россия, 196608, Санкт-Петербург, вн. тер. г. Пушкин, бульвар Алексея Толстого, 9, литера А, кв. 94.

Для цитирования: Агунов А. В., Щербань А. В., Архипов Д. Д., Кузнецов А. А., Симоненко К. Д. Выявление дуговых процессов в контактной сети городского электротранспорта методами осциллографического мониторинга и спектральной обработки // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 65–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-65-72

Аннотация

Цель: исследование направлено на разработку эффективных методов выявления дуговых процессов в контактной сети постоянного тока наземного городского электрического транспорта, негативно влияющих на работоспособность системы электроснабжения. **Методы:** использованы данные осциллографирования мгновенных значений токов и напряжений, регистрируемые устройствами аварийных событий. Алгоритмы спектрального анализа и статистической обработки применены для анализа полученных осциллограмм, включая искусственное моделирование дуговых повреждений и последующую проверку данных с реальных тяговых подстанций. **Результаты:** разработаны алгоритмы выявления дуговых процессов, подтвержденные экспериментально и путем анализа массивов данных, зарегистрированных на трех подстанциях. Установлены оптимальные уровни уставок для регистрации дуговых событий (среднее значение — около 20 А), выявлены особенности чувствительности алгоритмов и необходимость дальнейшей калибровки параметров. **Практическая значимость:** полученные результаты позволят повысить надежность системы электроснабжения городского электротранспорта за счет своевременного выявления и устранения негативных воздействий дуговых процессов. Предложенный метод может быть внедрен в существующие системы мониторинга и диагностики, обеспечивая снижение рисков выхода из строя электрооборудования и повышение общей эффективности функционирования транспортных сетей.

Ключевые слова: городской электрический транспорт, защита контактной сети, короткое замыкание, рекуперация энергии, мониторинг

В настоящей публикации продолжены исследования возможных методов выявления процессов, предшествующих возникновению электрической дуги с малыми токами короткого замыкания в контактной сети наземного городского электрического транспорта, первые результаты которых были представлены в предыдущих публикациях. Настоящий этап работы характеризуется систематизированным подходом с разделением исследования на последовательные этапы [1–3].

Методология выявления дуговых процессов в контактной сети постоянного тока основана на использовании данных осциллографирования мгновенных

значений токов и напряжений, которые могут быть получены от регистраторов аварийных событий, интегрированных в систему электроснабжения. Использование таких устройств обеспечивает регистрацию осциллограмм с высокой частотой дискретизации и значительно расширяет объем получаемой информации о режимах работы сети и отдельных нагрузок. Анализ данной информации и ее статистическая обработка дают возможность контроля возникающих в сети переходных процессов и могут быть использованы для решения ряда важных практических задач.

Одним из наиболее перспективных направлений анализа осциллограмм режимных параметров в контактной сети постоянного тока представляется определение факта возникновения дугового повреждения и выявление фидера, в котором оно возникло [4]. Такие повреждения являются относительно кратковременными, происходят через высокие сопротивления и сопровождаются токами с величинами, варьирующимися в широком диапазоне значений в зависимости от удаленности точки повреждения от центра питания и сопротивления дуги, в связи с чем их выявление представляет значительную сложность.

Для разработки и апробации алгоритмов, обеспечивающих выявление дуговых процессов в контактных сетях постоянного тока, были использованы результаты осциллографирования процессов при искусственно смоделированных дуговых повреждениях, выполненных ночью на ТПС-27. Дуга здесь имитировалась в фидере «Комаровский» с помощью сварочного электрода, включенного последовательно с резистором.

Измерения проводились в следующих режимах:

- длительная дуга на участке контактной сети, ближайшем к месту подключения фидера (три опыта);
- длительная дуга на конечном участке контактной сети (три опыта);
- длительная дуга одновременно с проходом трамвая с включенным двигателем (два опыта);
- прохождение трамвая через секционный изолятор с включенным двигателем и отключенным двигателем (с рекуперацией) [5] в прямом и обратном направлении (всего шесть опытов).

При выполнении опытов осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений фидеров, получающих питание от ТПС-27, записывались регистратором аварийных событий в условиях ручного запуска по телефонной команде.

Анализ записанных осциллограмм выполнялся с использованием специально разработанного программного обеспечения, выполняющего обработку мгновенных значений контролируемых напряжений и токов с использованием адаптивных алгоритмов спектрального анализа и статистической обработки.

Краткие результаты выполненных опытов с осциллограммами мгновенных значений напряжений на шинах питающей подстанции и тока в фидере, в котором

имитировалось повреждение, можно видеть на рис. 1–3. В каждом случае показан интервал времени, на котором, согласно принципам работы алгоритма, фиксировалось существование дугового процесса.

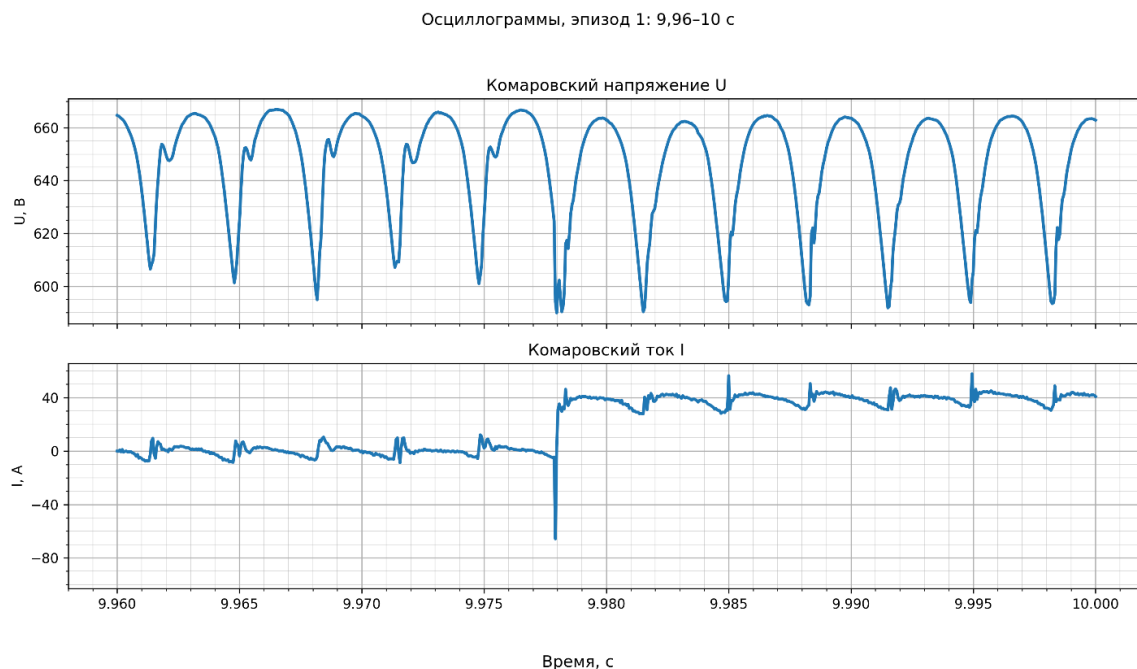


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения фидера «Комаровский» ТПС27 в момент зажигания дуги в начале линии

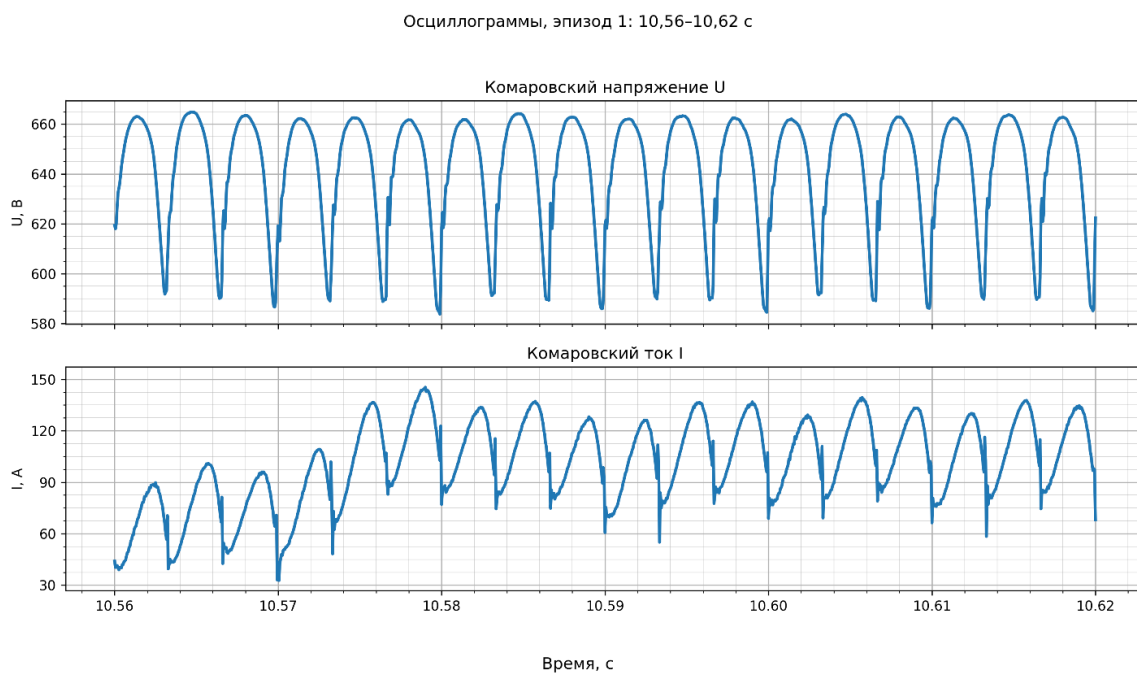


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения фидера «Комаровский» ТПС27 в момент зажигания дуги в конце линии

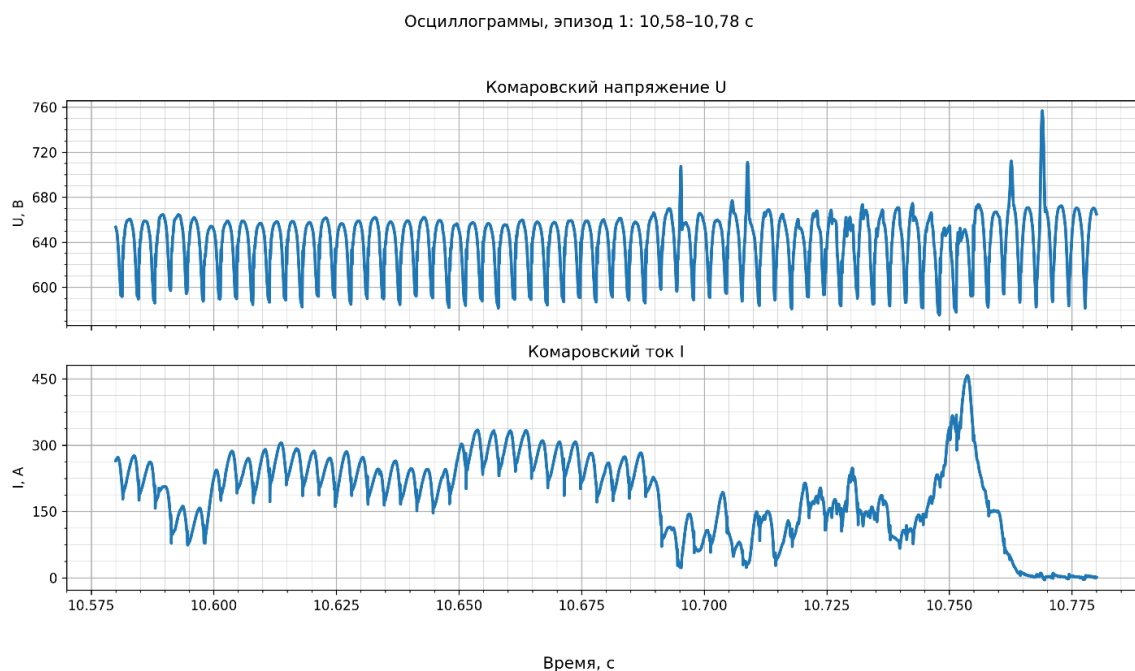


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения фидера «Комаровский» ТПС27 для случая пересечки обратной без тока

В ходе выполнения исследований, помимо анализа результатов искусственного моделирования дуговых процессов [6], была проведена обработка значительного объема осциллограмм, записанных регистраторами аварийных событий, установленными на подстанциях ТПС27, ТПС52 и ТПС70, за все время их работы начиная с конца декабря 2025 года.

Всего было обработано 1617 осциллограмм (952, 633 и 32 соответственно для указанных выше подстанций). Ожидается, наибольшее количество осциллограмм было записано на ТПС27, где регистратор был установлен раньше всего.

Рассмотрим полученную дополнительную информацию, которая, в частности, может быть использована для определения параметров уставок, позволяющих запустить регистраторы аварийных событий по факту возникновения потенциальных дуговых событий.

ТПС-27

На данной подстанции было зафиксировано 490 осциллограмм, содержащих в себе данные о возникших дуговых процессах.

Наиболее «аварийным» здесь является фидер «Комаровский», где была зафиксирована 271 осциллограмма с дуговыми процессами. Обратим внимание, что слово «аварийный» здесь заключено в кавычки, так как разработанные алгоритмы позволяют фиксировать и предельно кратковременные процессы, возникающие при нормальной эксплуатации сети и связанные со вспышками дуги, например, при отрыве пантографа от провода или в условиях плохой погоды (снег, дождь

и т. п.). В фидере «Шаумяна» было зафиксировано 105 осциллограмм, а в фидере «Республиканский» — 89.

В качестве основного параметра, позволяющего выявить факт возникновения переходных процессов, прием величину тока первой гармоники, которая всегда появляется принципиально в спектре токовых сигналов при их быстром значительном изменении. Согласно выполненной статистической обработке, ее максимальная величина на всех проанализированных осциллограммах находится в диапазоне 2,6–1538 А при среднем значении 20,5 А.

Столь высокий уровень разброса усложняет выбор уставки, позволяющей уверенно осуществлять запуск осциллографа. В связи с этим представляется возможным установить относительно низкое значение уставки для записи максимального объема осциллограмм, которые впоследствии должны автоматически анализироваться на факт возникновения дугового процесса с последующим удалением всех ложнозаписанных осциллограмм. Также при выборе уставки нужно определить, является ли необходимым контроль и учет коротких дуговых вспышек, неизменно возникающих при эксплуатации контактных сетей.

С учетом сказанного выше в качестве первого приближения в сети ТПС-27 рекомендуется выбрать уставку на уровне среднего значения 20 А. Также обратим внимание, что вследствие высокой скорости затухания процессов и их предельной нестабильности во времени работа осциллографа должна быть обеспечена по первому периоду появления заданного уровня гармоник.

ТПС-52

В сети данной подстанции наиболее «аварийным» является фидер «Коллонтай», где зафиксировано 218 (из 490) осциллограмм, потенциально содержащих дуговые процессы.

Далее со значительным отставанием следуют остальные фидеры: «Товарищеский» — 75 осциллограмм; «Антонова-Овсиенко» — 53; «Крыленко» — 49; «Солидарность» — 38; «Заречная» — 30 и «Подвойского» — 27.

Разброс величины тока первой гармоники здесь также велик и составляет 4,8–743 А при среднем значении 21,6 А, близком к зафиксированному в сетях ТПС-27.

Здесь также можно рекомендовать в качестве уставки выбрать величину 20 А.

ТПС-70

В сетях данной подстанции было зафиксировано минимальное количество дуговых событий:

- «Полтавский» — 9;
- «Херсонский» — 6;
- «Ивашенцева» — 5;

- «Золотоношский» — 4;
- «Ал. Невского» — 3.

Разброс величины тока первой гармоники здесь является намного меньшим и составляет 0,8–236 А при среднем значении 8,2 А.

Тем не менее здесь также можно рекомендовать в качестве уставки выбрать величину тока первой гармоники на уровне 20 А.

По результатам выполненной работы можно сформулировать следующие заключения:

1. Опытные исследования позволили разработать алгоритмы выявления возникающих в контактных сетях постоянного тока дуговых процессов, негативным образом влияющих на работу схемы электроснабжения подвижного состава.

2. Получено подтверждение возможности использования разработанных алгоритмов для обнаружения дуговых процессов с помощью осциллографирования текущих и предшествующих событиям значений токов и напряжений [7] в контактной сети со стороны тяговых подстанций и спектральным анализом мгновенных значений переменных.

3. Разработаны программные средства, позволяющие выполнять анализ большого массива данных с результатами осциллографирования и сбора статистической информации о параметрах возникавших переходных режимов.

4. Выявлена избыточная чувствительность разработанных алгоритмов, требующая дополнительной настройки их параметров с помощью дополнительных данных осциллографирования нормальных и аварийных режимов.

5. Необходим дополнительный технический анализ степени влияния кратковременных дуговых процессов на режимы работы оборудования и определение необходимости контроля параметров таких процессов.

Список источников

1. Правила технической эксплуатации трамвая (ПТЭ трамвай) / Минтранс России. М., 2016.
2. Правила технической эксплуатации троллейбуса (ПТЭ троллейбус) / Минтранс России. М., 2016.
3. Инструкция по устройству и обслуживанию контактной сети трамвая и троллейбуса / Минтранс России. М., 2005.
4. Афанасьев А. С. Контактные сети трамвая и троллейбуса: учебник для СПТУ. М.: Транспорт, 1988. 264 с.
5. Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Преобразование энергии рекуперации в городском электротранспорте // Вестник ПНИПУ. 2022. № 43. С. 5–28.
6. Яблоков А. А., Готовкина Е. Е. Компьютерное моделирование в электроэнергетике и электротехнике. Ч. 1. MATLAB. Иваново, 2021. 179 с.

7. Трофимов О. А., Глушков Н. В. Исследование влияния повышения напряжения и большого количества рекуперационных токов на безопасность и надежность функционирования городской контактной сети // Вестник науки и техники. 2022. № 12. С. 45–56.

Дата поступления: 24.03.2026

Решение о публикации: 06.05.2026

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — доктор техн. наук, профессор; alexagunov@mail.ru

ЩЕРБАНЬ Александр Владимирович — начальник ОСП «Энергохозяйство» СПб ГУП «Гор-электротранс»; en_gi@spbget.ru

АРХИПОВ Дмитрий Дмитриевич — заместитель начальника ПТО ОСП «Энергохозяйство» СПб ГУП «Горэлектротранс»; digital5563@icloud.com

КУЗНЕЦОВ Антон Алексеевич — технический директор ООО «Институт проблем энергетики»; ipe_rus@mail.ru

СИМОНЕНКО Кирилл Дмитриевич — лаборант; simonenko_kirill.03@mail.ru

Identification of Arc Processes in the Contact Network of Urban Electric Transport by Methods of Oscillographic Monitoring and Spectral Processing

**A. V. Agunov¹, A. V. Shcherban'², D. D. Arkhipov², A. A. Kuznetsov³,
K. D. Simonenko¹**

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

² SUE "Gorelectrotrans", 15 Syzranskaya st., Saint Petersburg, 196105, Russia

³ Institute of Energy Problems LLC, letter A, block 94, 9 Alexei Tolstoy boulevard, ext. ter. Pushkin, Saint Petersburg, 196608, Russia

For citation: Agunov A. V., Shcherban' A. V., Arkhipov D. D., Kuznetsov A. A., Simonenko K. D. Identification of Arc Processes in the Contact Network of Urban Electric Transport by Methods of Oscillographic Monitoring and Spectral Processing // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 65–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-65-72 (In Russian)

Abstract

Objective: the research is aimed at developing effective methods for detecting arc processes in the DC contact network of ground-based urban electric transport that negatively affect the performance of the power supply system. **Methods:** the oscilloscope data of instantaneous values of currents and voltages recorded by emergency event devices is used. Spectral analysis and statistical processing algorithms are used to analyze the obtained waveforms, including artificial modeling of arc damage and subsequent verification of data from real traction substations. **Results:** algorithms for detecting arc processes have been developed, which have been confirmed experimentally and by analyzing data arrays recorded at three substations. Optimal levels of settings for recording arc events have been established (the average value is about 20 A), the sensitivity features of the algorithms and the need for further calibration of the parameters have been identified. simulation of arc damage and subsequent verification of data from real traction substations. **Practical**

importance: the results obtained will improve the reliability of the urban electric transport power supply system by timely identifying and eliminating the negative effects of arc processes. The proposed method can be implemented into existing monitoring and diagnostic systems, reducing the risks of electrical equipment failure and improving the overall efficiency of transport networks.

Keywords: urban electric transportation, overhead contact network protection, short circuit, energy recuperation, monitoring

References

1. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii tramvaya (PTE tramvay) [Technical Rules for Tramway Operation], Ministry of Transport of Russia, Moscow, 2016. (In Russian)
2. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii trolleybusa (PTE trolleybus) [Technical Rules for Trolleybus Operation], Ministry of Transport of Russia, Moscow, 2016. (In Russian)
3. Instruktsiya po ustrojstvu i obsluzhivaniyu kontaktnoy seti tramvaya i trolleybusa [Instructions on Construction and Maintenance of Tramway and Trolleybus Overhead Contact System], Ministry of Transport of Russia, Moscow, 2005. (In Russian)
4. Afanasiev A. S. Kontaktnije seti tramvaja i trolleybusa: uchebnik dlja SPTU [Contact Networks of Trams and Trolleybuses: A Textbook for Secondary Specialized Educational Institutions], Moscow, Transport, 1988, 264 p. (In Russian)
5. Katsaj A. V. Preobrazovaniye energii rekuperatsii v gorodskom elektrotransportye [Conversion of Recuperated Energy in Urban Electric Transport], *Vestnik PNIPU [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University]*, 2022, no. 43, pp. 5–28. (In Russian)
6. Yablokov A. A., Gotovkina E. E. Komp'yuternoye modelirovaniye v elektroenergetike i elektrotekhnike. Chast' 1. MATLAB [Computer Modeling in Electrical Engineering and Electrotechnology. Part 1. MATLAB], Ivanovo, 2021, 179 p. (In Russian)
7. Trofimov O. A., Glushkov N. V. Issledovanie vliyaniya povysheniya napryazheniya i bol'shogo kolichyestva rekuperatsionnykh tokov na bezopasnost' i nadyozhnost' funktsionirovaniya gorodskoy kontaktnoy seti [Study of the Influence of Increased Voltage and a Large Number of Recuperative Currents on the Safety and Reliability of City Contact Network Functioning], *Vestnik nauki i tekhniki [Science and Technology Bulletin]*, 2022, no. 12, pp. 45–56. (In Russian)

Received: March 24, 2026

Accepted: May 06, 2026

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Alexander V. SHCHERBAN' — Head of the SSE “Energokhozhestvo” of SUE “Gorelectrotrans”; en_gi@spbget.ru

Dmitry D. ARKHIPOV — Deputy Head of the PTO SSE “Energokhozhestvo” of SUE “Gorelectrotrans”; digital5563@icloud.com

Anton A. KUZNETSOV — Technical Director, Institute of Energy Problems LLC; ipe_rus@mail.ru

Kirill D. SIMONENKO — Laboratory Assistant; simonenko_kirill.03@mail.ru

УДК 621.332

Электротепловая модель контактной сети переменного тока и механизм плавления гололедных отложений при автотрансформаторной системе тягового электроснабжения

Июань Ли, И. П. Викулов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ли Июань, Викулов И. П. Электротепловая модель контактной сети переменного тока и механизм плавления гололедных отложений при автотрансформаторной системе тягового электроснабжения // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 73–85. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-73-85

Аннотация

Цель: разработка электротепловой модели плавления гололедных отложений контактной сети электрифицированной железной дороги при автотрансформаторной системе тягового электроснабжения с учетом неравномерного обледенения и теплофизических свойств многослойной системы «проводник — воздушный зазор — лед — окружающая среда». **Методы:** при исследовании процесса плавления построена двумерная нестационарная тепловая модель поперечного сечения системы «проводник — воздушный зазор — лед — окружающая среда». Источники тепла определены по закону Джоуля — Ленца при заданном токе нагрева, фазовый переход учтен методом эквивалентной теплоемкости, а внешние теплотери описаны радиационно-конвективным теплообменом. Численное моделирование температурного поля выполнено методом конечных элементов. **Результаты:** установлено, что при электротепловом плавлении гололедных отложений формируется неравномерное температурное поле, обусловленное последовательным переносом тепла от проводника к ледяной оболочке через воздушный зазор. Показано, что геометрическая неравномерность обледенения изменяет граничные условия теплообмена и приводит к различию теплового отклика элементов системы, определяя пространственные особенности и кинетику процесса плавления. **Практическая значимость:** разработанная модель может применяться для анализа тепловых режимов удаления гололеда на проводах контактной сети и оценки энергетических параметров плавильных режимов. Полученные результаты позволяют уточнить физический механизм электротеплового плавления гололедных отложений и могут служить основой для дальнейших исследований процессов противообледенительной защиты контактной сети.

Ключевые слова: железная дорога, контактная сеть, автотрансформаторная система, гололедное отложение, плавление льда, метод конечных элементов

Введение

Электрифицированные железные дороги предъявляют повышенные требования к надежности тягового электроснабжения. Совместная работа системы «токоприемник — контактная сеть» определяет устойчивость и качество токосъема, что напрямую влияет на безопасность движения и тяговые характеристики подвижного состава [1].

В условиях отрицательных температур на проводах контактной сети формируются гололедные отложения, изменяющие геометрию и электрические параметры

проводников. Это приводит к нарушению стабильности контактного взаимодействия, увеличению механической нагрузки на элементы подвески и снижению эксплуатационной надежности системы в зимний период.

Тепловое плавление гололеда током повышенной величины является распространенным инженерным решением для восстановления работоспособности контактной сети [2]. Эффективность такого способа удаления льда определяется тепловым балансом системы, включающим тепловыделение по закону Джоуля — Ленца в проводнике, теплоперенос через многослойную структуру «проводник — лед — окружающая среда» и интенсивность теплообмена с окружающей средой [10].

Существенное влияние на тепловой режим оказывает характер формирования ледяной оболочки. В условиях повышенной влажности рост обледенения контактных проводов имеет явно выраженный неравномерный характер, что связано с аэродинамическими условиями обтекания проводников и особенностями их геометрического профиля. Формирование асимметричной ледяной оболочки приводит к изменению граничных условий теплообмена и может существенно влиять на динамику температурного отклика при электротепловом плавлении.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных противообледенительным мероприятиям на устройствах электроснабжения железных дорог, ряд аспектов электротеплового процесса плавления гололедных отложений, включая взаимосвязь теплового отклика и фазового перехода, остается недостаточно изученным [5, 11]. В частности, требует уточнения влияние геометрической неравномерности ледяной оболочки на распределение температурного поля и кинетику фазового перехода в системе «проводник — лед» [3].

В связи с этим актуальной задачей является разработка физически обоснованной модели электротеплового плавления гололедных отложений, учитывающей реальную структуру многослойной системы и нестационарный характер теплопереноса.

В данной работе рассматривается электротепловой механизм плавления льда на проводах контактной сети. Построена нестационарная тепловая модель поперечного сечения системы «проводник — воздушный зазор — лед — окружающая среда», позволяющая исследовать формирование температурного поля и последовательность фазовых преобразований в процессе нагрева.

Анализ типов и физико-механических характеристик гололедных отложений контактной сети

Формирование гололедных отложений на проводах контактной сети определяется совокупностью метеорологических факторов, включая температуру воздуха, скорость ветра, концентрацию и размер переохлажденных капель [4]. Указанные параметры задают режим фазового перехода и условия роста ледяной оболочки.

В зависимости от их сочетания реализуются различные сценарии обледенения, приводящие к образованию ледяных структур, различающихся по плотности, адгезионной прочности и теплофизическим характеристикам. Эти различия определяют величину дополнительной механической нагрузки на проводники, условия токоотвода и параметры теплового плавления.

Согласно метеорологической классификации и данным инженерных наблюдений, основные типы обледенения контактной сети и их ключевые характеристики приведены в таблице [5].

ТАБЛИЦА. Типы гололедных отложений контактной сети и их основные характеристики

Тип обледенения	Диапазон плотности, г/см ³	Адгезионная прочность	Типичная морфология	Влияние на систему «токоприемник — контактная сеть»
Снег	0,05–0,6	Низкая	Цилиндрическая или асимметричная оболочка	Увеличение механической нагрузки на проводники, возможное возбуждение колебаний и галопирования
Изморозь	< 0,6	Средняя	Зернистая, пористая или флаговидная структура	Снижение электрической прочности изоляции, повышение вероятности перекрытия и пробоя
Смешанное обледенение	0,6–0,8	Высокая	Неравномерная плотная оболочка	Одновременное усиление механического и электрического воздействия
Гололед	0,8–0,9	Очень высокая	Прозрачная плотная ледяная корка, образование ледяных наростов	Максимальное энергопотребление при плавлении, наибольшая сложность удаления

Анализ данных таблицы показывает, что типы гололедных отложений существенно различаются по плотности, структуре и адгезионной прочности, что определяет степень их механического и электрического воздействия на контактную сеть. Пористые снежные и изморозевые образования характеризуются пониженной плотностью и ограниченной устойчивостью ледовой нагрузки, тогда как смешанные формы и, в наибольшей степени, плотный гололед обладают повышенной адгезией и непористой структурой. Последний тип формирует максимальную эквивалентную нагрузку на проводники, увеличивает тепловую инерцию системы и требует повышенных энергетических затрат при плавлении [6].

Следовательно, при моделировании процесса удаления льда приоритетное значение имеют физико-механические свойства плотных гололедных образований, формирование которых протекает по термодинамическому механизму «влажного» роста [7].

Переход к схеме «влажного» роста реализуется при выполнении условия $0 < a_3 < 1$, где a_3 — коэффициент замерзания, характеризующий долю захваченной воды, переходящей в твердую фазу. При $a_3 < 1$ часть влаги сохраняется в жидком состоянии, формируя поверхностную пленку и создавая двухфазную систему «лед — вода». В этих условиях температура поверхности поддерживается вблизи точки фазового перехода, что придает процессу квазиизотермический характер.

Значение a_3 определяется локальными условиями теплообмена, прежде всего интенсивностью конвективной теплоотдачи. Повышенная влажность, рост скорости ветра и температура окружающей среды, близкая к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, способствуют снижению a_3 и формированию плотной ледяной структуры с высокой адгезионной прочностью.

Вследствие сложной геометрии поперечного сечения контактного провода (рис. 1) процесс «влажного» роста характеризуется выраженной пространственной неоднородностью, которая обусловлена локальными геометрическими и аэродинамическими факторами [8]. Канавочные элементы контактного провода, наветренная зона несущего троса и участки геометрических неоднородностей (зажимы, арматура) характеризуются повышенным коэффициентом захвата капель и интенсифицированным теплообменом, что приводит к локальной аккумуляции ледяной массы и формированию эксцентричной, асимметричной оболочки [9].

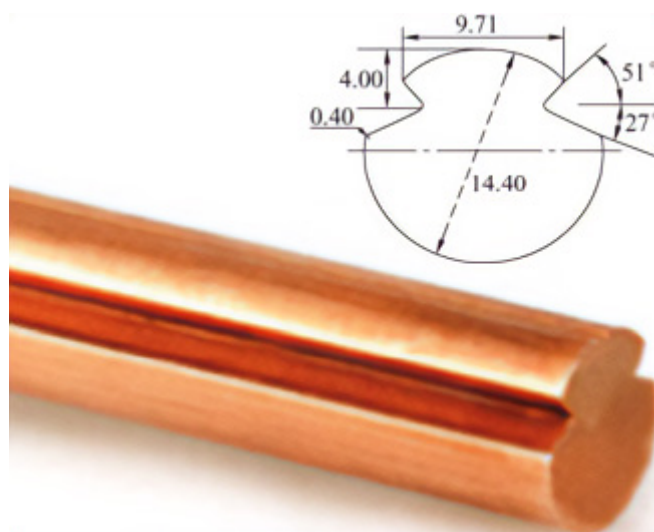


Рис. 1. Схема поперечного сечения контактного провода [5]

Описанные локальные эффекты накопления льда обуславливают формирование выражено несимметричной ледяной оболочки с эксцентричным распределением массы и локальными утолщениями. Инженерные наблюдения (рис. 2) подтверждают типичную морфологию неравномерного обледенения, характеризующуюся смещением ледяной массы к наветренной стороне и формированием асимметричного внешнего контура [5].

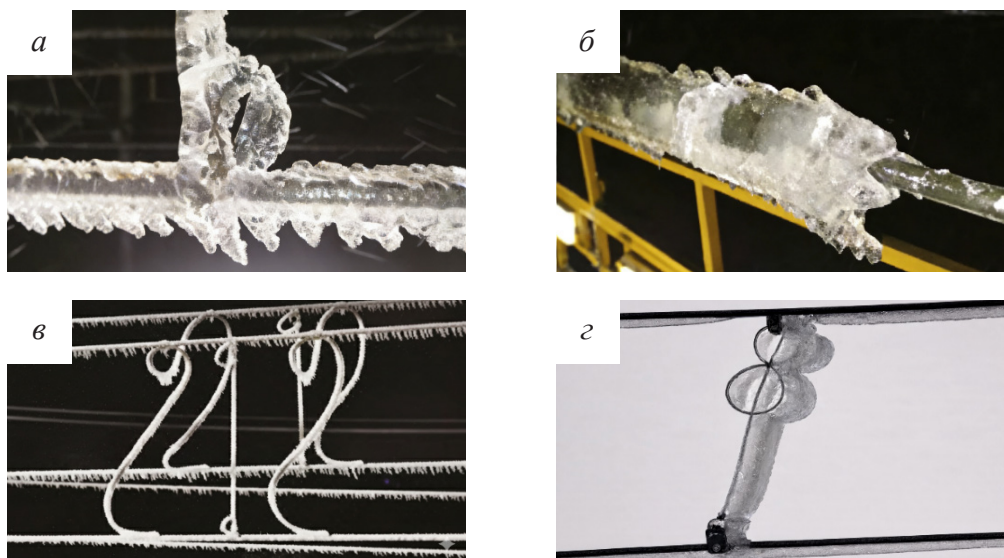


Рис. 2. Типичные морфологические конфигурации неравномерного обледенения проводов контактной сети [5]: *а* — сосульчатая форма, *б* — веерообразная форма, *в* — гребневидная форма, *г* — серповидная форма

Таким образом, в условиях «влажного» роста текучесть поверхностной водяной пленки и геометрически обусловленные эффекты определяют изменение эквивалентного профиля проводника и граничных условий теплообмена, что непосредственно влияет на интенсивность нагрева и неравномерность процесса плавления.

Процесс плавления и физическая модель

Гололедные отложения, формирующиеся в условиях «влажного» роста, характеризуются высокой плотностью, значительной адгезионной прочностью и выраженной асимметрией распределения массы. Текучесть поверхностной водяной пленки и геометрически индуцированные эффекты (включая влияние продольных канавок контактного провода) приводят к формированию существенно неравномерной ледяной оболочки [10].

Указанные особенности требуют построения тепловой модели плавления, учитывающей реальную геометрию поперечного сечения проводника, многослойную структуру системы «проводник — воздушный зазор — лед» и радиационно-конвективные механизмы теплообмена, что позволяет корректно описать изменение температурного поля при пропускании тока [11].

С целью анализа нестационарного теплового отклика построена двумерная модель теплопереноса в поперечном сечении (рис. 3). При дальнейшей реализации рассматриваемой модели в среде MATLAB принята упрощенная расчетная схема, приведенная к осесимметричной (круговой) форме (рис. 3б), получаемая погрешность при таком преобразовании не превышает допустимых значений.

Расчетная область включает четыре подобласти: проводник Ω_3 , воздушный зазор Ω_2 , ледяную оболочку Ω_1 и приповерхностную воздушную среду Ω_0 . Геометрия проводника задается с учетом его реального профиля, тогда как лед и воздушный зазор аппроксимируются эквивалентными концентрическими слоями, что обеспечивает сохранение инженерно значимых параметров (наружный диаметр, толщина слоев) при упрощении расчетной схемы и обеспечении вычислительной устойчивости.

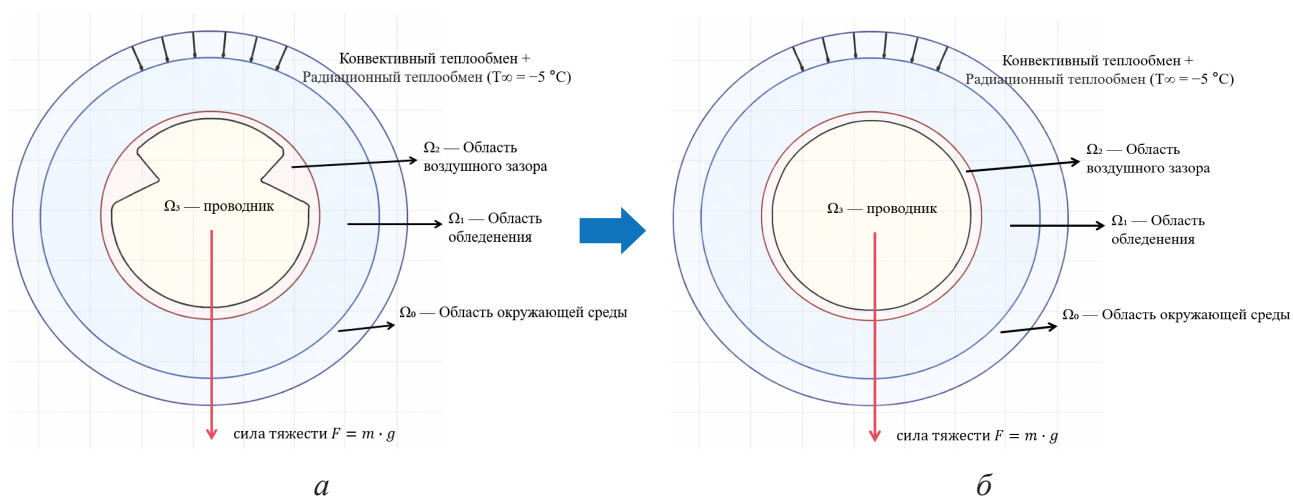


Рис. 3. Расчетная область и граничные условия тепловой модели:

a — исходная схема поперечного сечения, *б* — упрощенная расчетная схема модели

Далее приведены постановка нестационарной задачи теплопереноса и граничные условия, используемые в численной реализации.

В процессе формирования и плавления ледяной оболочки на проводнике система находится в поле действия силы тяжести, которая определяется выражением:

$$f = mg, \quad (1)$$

где m — масса ледяной оболочки, кг;

g — ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

В каждой подобласти Ω_j температурное поле $T(x, t)$ описывается нестационарным уравнением теплопроводности:

$$\rho_j c_j(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_j \nabla T) + q_j, \quad \mathbf{x} \in \Omega_j, \quad j \in \{w, g, i, a\}, \quad (2)$$

где ρ_j — плотность материала, кг/м³;

$c_j(T)$ — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К);

k_j — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);

q_j — объемный источник тепла, Вт/м³.

В области проводника объемный источник тепла задается по закону Джоуля — Ленца:

$$q_w = \frac{I^2 R'}{A_w}, \quad q_g = q_i = q_a = 0, \quad (3)$$

где I — действующее значение тока, А;

R' — сопротивление переменному току на единицу длины, Ом/м;

A_w — площадь поперечного сечения проводника, м².

На границах раздела Γ_{jk} обеспечиваются непрерывность температуры и теплового потока:

$$T_j = T_k, \quad k_j \nabla T_j \cdot n = k_k \nabla T_k \cdot n, \quad x \in \Gamma_{jk}, \quad (4)$$

где n — единичная нормаль к границе раздела.

На внешней границе Γ_{out} задается радиационно-конвективный теплообмен:

$$-k_a \nabla T \cdot n = h(T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4), \quad (5)$$

где T_∞ — температура окружающей среды, К;

h — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К);

ε — коэффициент излучательной способности (эмиссивность);

σ — постоянная Стефана — Больцмана, Вт/(м²·К⁴);

T_s — температура поверхности на границе теплообмена.

Начальное распределение температуры принимается равным температуре окружающей среды:

$$T(x, 0) = T_\infty, \quad x \in \Omega_w \cup \Omega_g \cup \Omega_i \cup \Omega_a. \quad (6)$$

В области льда фазовый переход учитывается методом эквивалентной теплоемкости:

$$c_i(T) = c_{ice} + \frac{L_f}{\Delta T_m}, \quad T \in \left[T_m - \frac{\Delta T_m}{2}, T_m + \frac{\Delta T_m}{2} \right], \quad (7)$$

где L_f — удельная теплота плавления, Дж/кг;

T_m — температура фазового перехода, К;

ΔT_m — ширина температурного интервала фазового перехода, К.

Вне указанного интервала принимается $c_i(T) = c_{ice}$.

Такой подход обеспечивает энергетическую эквивалентность фазового перехода без явного отслеживания границы фаз и сохраняет вычислительную устойчивость нестационарной задачи.

Численная реализация модели в среде MATLAB

Для численного исследования электротеплового процесса плавления гололедных отложений разработана вычислительная модель в среде MATLAB с использованием пакета PDE Toolbox, предназначенного для решения задач теплопереноса методом конечных элементов.

На рис. 4 представлены фрагмент программной реализации модели и результаты численного моделирования, отражающие характерную эволюцию температурного поля в процессе электротеплового плавления льда.

Реализация модели основана на решении нестационарного уравнения теплопроводности (2) в многослойной системе «проводник — воздушный зазор — лед — окружающая среда». Геометрия расчетной области задается в виде двумерного поперечного сечения контактного провода с ледяной оболочкой. Расчетная область разбивается на несколько подобластей, соответствующих различным физическим средам, для каждой из которых задаются индивидуальные теплофизические параметры: коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость.

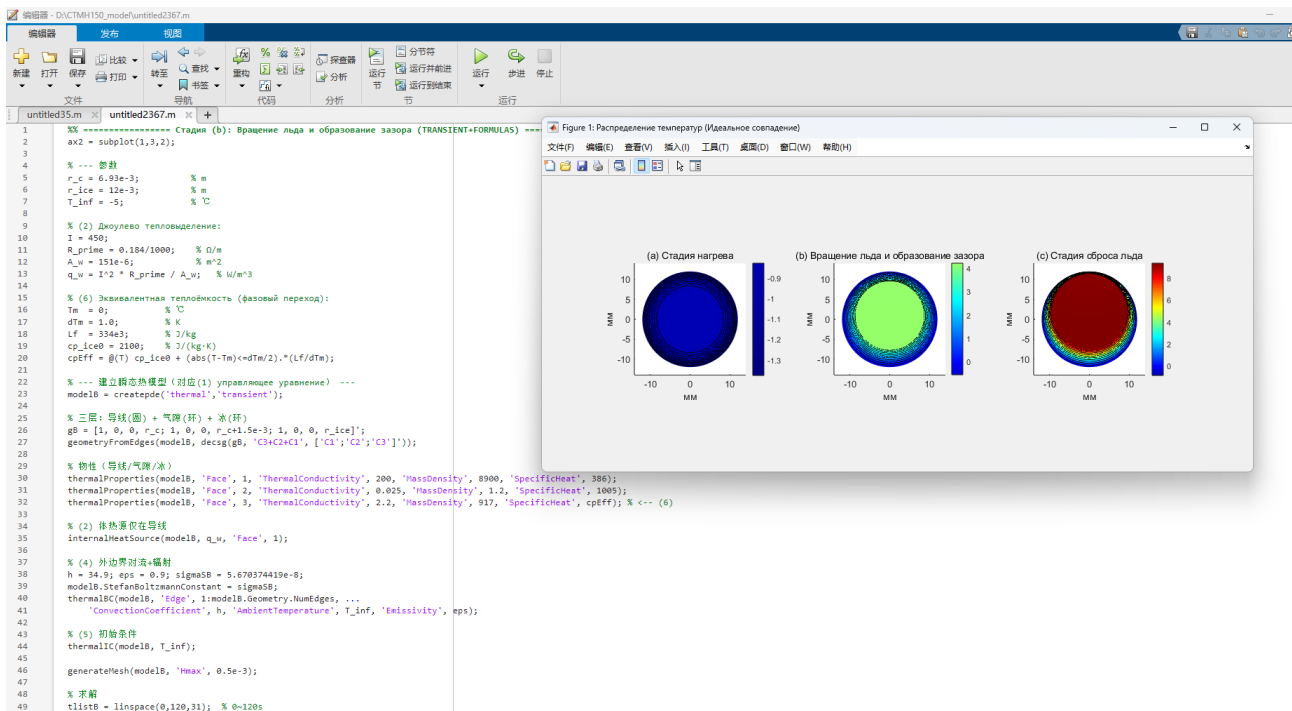


Рис. 4. Моделирование процесса электротеплового плавления гололеда в MATLAB

В области проводника задается объемный источник тепла, определяемый законом Джоуля — Ленца (3). В области льда фазовый переход учитывается методом эквивалентной теплоемкости, что позволяет описывать процесс плавления без явного отслеживания границы раздела фаз и обеспечивает численную устойчивость расчета.

На внешней границе расчетной области реализуются граничные условия радиационно-конвективного теплообмена (5), описывающие теплообмен с окружающей атмосферой. Начальное распределение температуры принимается равным температуре окружающей среды.

Численное решение задачи выполняется методом конечных элементов на неструктурированной сетке. Расчет температурного поля осуществляется во временной области с использованием встроенных алгоритмов интегрирования MATLAB.

Эволюция температурного поля и стадии процесса плавления

Рассчитанные температурные поля, полученные на разработанной модели (рис. 5), отражают характерную динамику электротеплового плавления, обусловленную последовательным переносом тепла от проводника к внешним слоям системы [11].

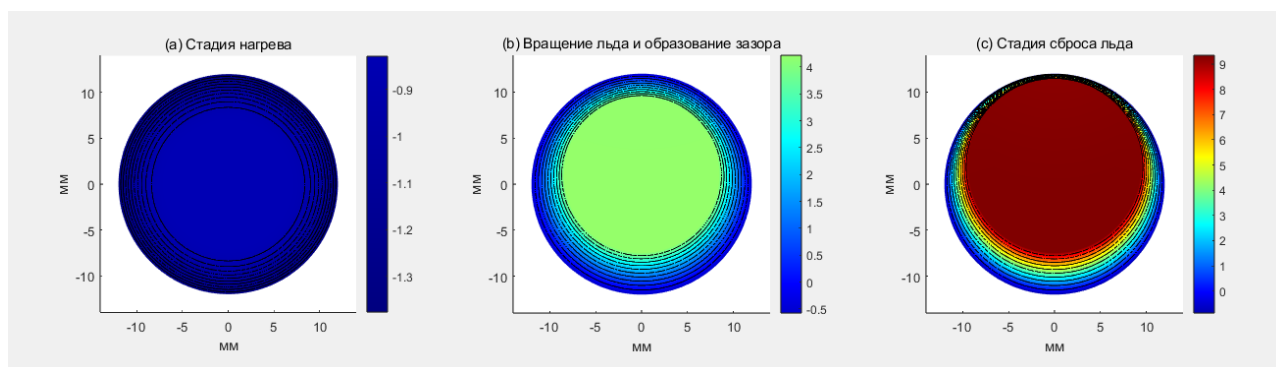


Рис. 5. Изменение температурного поля при электротепловом плавлении гололеда

На начальной стадии тепловыделение по закону Джоуля — Ленца в области проводника Ω_3 формирует максимум температуры в его поперечном сечении, тогда как воздушный зазор Ω_2 и ледяная оболочка Ω_1 сохраняют пониженную температуру вследствие их суммарного теплового сопротивления. Распределение температур носит преимущественно радиальный характер.

По мере нагрева усиливается температурный градиент на границе раздела, что интенсифицирует теплопередачу через многослойную систему «проводник — зазор — лед». Сгущение изотерм вблизи поверхности проводника свидетельствует о доминирующей роли межслойного теплового сопротивления.

При достижении внутренней поверхностью льда температуры фазового перехода инициируется плавление со стороны проводника, тогда как внешняя поверхность остается охлаждаемой радиационно-конвективным теплообменом. Возникающая радиальная температурная стратификация отражает неравномерность теплового отклика и определяет кинетику последующего удаления льда.

Заключение

В работе исследован электротепловой процесс плавления гололеда, который образуется на проводах контактной сети электрифицированных железных дорог из-за выпадения ледяного дождя. Рассмотрены особенности формирования ледяной оболочки и ее влияние на тепловые условия процесса плавления в многослойной системе «проводник — воздушный зазор — лед — окружающая среда».

Показано, что в условиях «влажного» роста геометрические особенности элементов цепной подвески способствуют формированию пространственно-несимметричной структуры обледенения. Такая морфология ледяной оболочки приводит к изменению граничных условий теплообмена и формированию неоднородного температурного поля при электротепловом нагреве проводника.

На основе разработанной нестационарной тепловой модели установлено, что процесс плавления ледяной оболочки характеризуется последовательным переносом тепла от проводника к внешним слоям системы и сопровождается формированием выраженной радиальной температурной стратификации. Образование воздушного зазора между проводником и ледяной оболочкой существенно изменяет тепловое сопротивление системы и определяет кинетику последующего разрушения ледяного слоя.

Полученные результаты позволяют уточнить физический механизм электротеплового плавления гололедных отложений на проводах контактной сети и могут быть использованы при анализе тепловых режимов противообледенительных мероприятий на электрифицированных железных дорогах.

Следует подчеркнуть, что эффективность плавильных режимов на протяженных участках контактной сети определяется не только теплофизическими характеристиками системы, но и электрическими параметрами тягового контура. В частности, существенное влияние могут оказывать распределение токов между элементами цепной подвески и реактивная составляющая полного сопротивления системы. Комплексный анализ указанных факторов, а также оценка возможностей применения средств динамической компенсации реактивной мощности требуют отдельного рассмотрения и являются предметом дальнейших исследований [11].

Список источников

1. Бодров П. А., Попова Н. А. Эффективность противогололедных мероприятий на устройствах электроснабжения железных дорог // Инженерный вестник Дона. 2025. № 10 (130).
2. Способ подогрева проводов контактной подвески: патент № 2485656 С1 Российская Федерация, МПК H02G 7/16. № 2012111289/07 / Ефимов А. В., Паранин А. В., Ефимов Д. А.; заявитель ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения»; заявл. 23.03.2012; опубл. 20.06.2013. Бюл. № 17.
3. Xing Jinhui. Optimization Research on Anti-Icing Technology for Catenary of Electrified Railway: dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

4. Богданова К.В. Методика и технические решения управляемого профилактического подогрева проводов контактной сети постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2024. 162 с.
5. Прогресс исследований в области технологии противообледенительной обработки контактной сети высокоскоростных железных дорог / Ц. Чен [и др.] // Журнал электротехники. 2025. Т. 20, №4. С. 452–464.
6. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты / Н.П. Шакина [и др.] // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. № 348. С. 130–161.
7. Guo Lei. Ice Mechanism and On-Line Anti-Icing Technology for Catenary of Electrified Railway: Dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
8. Министерство железных дорог Китайской Народной Республики. Многожильные провода из меди и медных сплавов для электрифицированных железных дорог: ТВ/Т 3111–2017. Пекин: Китайское железнодорожное издательство, 2017.
9. Study on Mechanical Deicing Technology for Catenary / Gong Yansheng [et al.] // High Speed Railway Technology. 2018. Vol. 9, no. 1. Pp. 43–47.
10. Alexiades V., Solomon A. D. Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1993.
11. Ли Июань, Викулов И.П. Развитие технологии борьбы с гололедом на контактной сети железных дорог // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. № 1.

Дата поступления: 01.04.2026

Решение о публикации: 10.05.2026

Контактная информация:

ЛИ Июань — аспирант; 1005458004@qq.com

ВИКУЛОВ Илья Павлович — кандидат техн. наук, доцент; i_vikulov@mail.ru

Electrothermal Model of an AC Catenary and Mechanisms of Ice Melting under an Autotransformer Traction Power Supply System

Yiyuan Li, I. P. Vikulov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Li Yiyuan, Vikulov I. P.* Electrothermal Model of an AC Catenary and Mechanisms of Ice Melting under an Autotransformer Traction Power Supply System // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 73–85. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-73-85 (In Russian)

Abstract

Objective: to develop an electrothermal model for melting ice accretions on the catenary system of an electrified railway under an autotransformer traction power supply system, taking into account non-uniform icing and the thermophysical properties of the multilayer system “conductor — air gap — ice — ambient environment”. **Methods:** to investigate the melting process, a two-dimensional transient thermal model of the cross-section of the “conductor — air gap — ice — ambient environment” system was developed. Heat sources were defined according to the Joule — Lenz law for a prescribed heating current, phase change was incorporated using the equivalent heat capacity method, and external heat losses were described by radiative-convective heat transfer. Numerical simulation of the temperature field was performed using the finite element method. **Results:** it was established that electrothermal melting of ice accretions leads to the formation of a non-uniform temperature field caused by sequential heat transfer from the conductor to the ice layer through the air gap. It was shown that geometric non-uniformity of icing modifies the heat-transfer boundary conditions and causes differences in the thermal response of the system elements, thereby determining the spatial characteristics and kinetics of the melting process. **Practical significance:** the developed model can be used to analyze thermal regimes for de-icing overhead wires and to evaluate the energy parameters of melting processes. The results obtained allow us to clarify the physical mechanism of electrothermal melting of ice deposits and can serve as a basis for further research into overhead wire de-icing processes.

Keywords: railway, catenary, autotransformer traction power supply system, ice accretion, non-uniform icing, finite element method

References

1. Bodrov P.A., Popova N.A. Effektivnost' protivogolodnykh meropriyatiy na ustroystvakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Efficiency of Anti-Icing Measures on Railway Power Supply Facilities], *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, 2025, no. 10 (130). (In Russian)
2. Efimov A.V., Paranin A.V., Efimov D.A. Sposob podogreva provodov kontaktnoi podveski [Method for Heating Contact Suspension Wires]. Patent RF no. 2485656 C1, IPC H02G 7/16. Application no. 2012111289/07, filed 23.03.2012, published 20.06.2013. Appl.: Ural State University of Railway Transport. Bull. no. 17. (In Russian)
3. Xing Jinhui. Optimization Research on Anti-Icing Technology for Catenary of Electrified Railway: Dissertation, Chengdu, Southwest Jiaotong University, 2021.
4. Bogdanova K.V. Metodika i tekhnicheskie resheniya upravlyаемого profilakticheskogo podogreva provodov kontaktnoi seti postoyannogo toka [Methodology and Technical Solutions for Controlled Preventive Heating of DC Contact Network Wires]: dis. ... PhD in Engineering, Samara, 2024, 162 p. (In Russian)
5. Chen C., et al. Progress issledovaniy v oblasti tekhnologii protivogolodnoi obrabotki kontaktnoi seti vysokoskorostnykh zheleznykh dorog [Research Progress in Anti-Icing Technology for High-Speed Railway Catenary], *Zhurnal elektrotekhniki [Journal of Electrical Engineering]*, 2025, vol. 20, no. 4, pp. 452–464. (In Russian)
6. Shakina N.P., et al. Obrazovanie i prognozirovaniye zamerzayushchikh osadkov: obzor literatury i nekotorye novye rezul'taty [Formation and Forecasting of Freezing Precipitation: Literature Review and Some New Results], *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo*

tsentra Rossijskoj Federatsii [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation], 2012, no. 348, pp. 130–161. (In Russian)

7. Guo Lei. Ice Mechanism and On-Line Anti-Icing Technology for Catenary of Electrified Railway: Dissertation, Chengdu, Southwest Jiaotong University, 2013.

8. Ministerstvo zheleznykh dorog Kitajskoj Narodnoj Respubliki. Mnogozhil'nye provoda iz medi i mednykh splavov dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Ministry of Railways of the People's Republic of China. Stranded Copper and Copper-Alloy Conductors for Electrified Railways: TB/T 3111-2017], Beijing, China Railway Publishing House, 2017. (In Russian)

9. Gong Yansheng, et al. Study on Mechanical Deicing Technology for Catenary. *High Speed Railway Technology*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 43–47.

10. Alexiades V., Solomon A.D. Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes, Washington, Hemisphere Publishing Corporation, 1993.

11. Li Yiyuan, Vikulov I.P. Razvitie tekhnologii bor'by s gololyodom na kontaknoi seti zheleznykh dorog [Development of Ice Mitigation Technology for Railway Catenary], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2025, no. 1. (In Russian)

Received: April 01, 2026

Accepted: May 10, 2026

Author's information:

Yiyuan LI — Postgraduate Student; 1005458004@qq.com

Ilya P. VIKULOV — PhD in Engineering, Associate Professor; i_vikulov@mail.ru

УДК 656.212.5+681.5

Методика проектирования робототехнических комплексов для расформирования составов на сортировочной горке

В. В. Кудюкин, В. С. Кузьмин

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Россия, 109029, Москва, Нижегородская ул., 27, стр. 1

Для цитирования: Кудюкин В. В., Кузьмин В. С. Методика проектирования робототехнических комплексов для расформирования составов на сортировочной горке // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 86–104. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-86-104

Аннотация

Цель: рассмотреть вопросы проектирования робототехнических комплексов, предназначенных для расформирования составов на сортировочных горках (далее — РТК) в условиях ограничений, накладываемых на размещение соответствующей инфраструктуры вдоль пути надвига, а также наличия неравномерности длин формируемых отцепов. Показать необходимость учета в рамках выполнения проектирования характеристик и показателей качества функционирования РТК, определяемых на основе результатов имитационного моделирования при наихудших условиях. **Методы:** включают анализ научной и технической литературы, посвященной вопросам выбора конструкции, проектирования и моделирования работы РТК; имитационное моделирование для определения параметров работы мобильной платформы робототехнического комплекса. **Результаты:** разработана методика проектирования РТК, включающая в себя пять основных этапов: сбор и обработку первичных данных об объекте внедрения и предполагаемых к внедрению технических средствах; выбор вариантов реализации с учетом ограничений на размещение соответствующей инфраструктуры; выбор вариантов реализации по стоимостному критерию и их имитационное моделирование для определения максимального числа правильно сформированных подряд отцепов при наихудших условиях: максимальной скорости надвига, минимальной длине отцепа по осям автосцепок и минимальной протяженности зоны действия мобильной платформы. **Практическая значимость:** предложенная методика позволяет выбрать конфигурацию РТК, обеспечивающую заданный уровень вероятности ошибки при формировании идущих подряд в сортировочном листке отцепов минимальной длины с учетом ограничений, накладываемых местными условиями.

Ключевые слова: сортировочная станция, сортировочная горка, робототехнический комплекс, расформирование железнодорожных составов, проектирование

Введение

Концепция «Цифровая железнодорожная станция» открытого акционерного общества «Российские железные дороги» предполагает внедрение робототехнических комплексов (далее — РТК) для выполнения ряда технологических операций, предусматривающих взаимодействие с железнодорожным подвижным составом [1–3]. Такие технические средства, в частности, планируется использовать при расформировании составов на сортировочной горке [4–7].

Интеграция РТК для расформирования составов на сортировочной горке в существующую инфраструктуру представляет собой сложную техническую задачу. С одной стороны, необходимо учесть характеристики объекта

внедрения — сортировочной станции (пути надвига), а с другой — характеристики перспективного технологического процесса, например максимальную потребную скорость надвига.

Вопросу применения РТК на железнодорожной станции в рамках технологического процесса расформирования составов посвящен целый ряд исследований, в частности [8, 9]. Однако исследования, связанные с разработкой методов проектирования, создания и оптимизации таких технических средств, отсутствуют. В литературе описываются только концептуальные проекты и результаты испытаний отдельных прототипов и их функциональных узлов [10–14]. С учетом этого требуются соответствующие методические указания, формализующие процесс разработки и проектирования. Таким образом целью настоящей работы выбрано формулирование методических основ проектирования РТК для расформирования составов на сортировочной горке.

Материалы и методы

В ряде исследований, в частности в [15], указано, что при решении задач разработки и проектирования сложной технической системы часто не учитываются показатели качества или эффективности ее функционирования. Поэтому предложенные методологические основы опираются на характеристики и показатели качества функционирования РТК, установленные с учетом результатов имитационного моделирования, изложенных в [16]. К ним относятся:

- расстояние, проходимое мобильной платформой (МП) РТК при движении в одном направлении с автосцепкой, подлежащей расцепке, при наихудших условиях;
- максимальное количество подряд правильно сформированных отцепов минимальной длины по осям автосцепок;
- вероятность пропуска автосцепки, подлежащей расцепке, в установившемся режиме при наихудших условиях.

В качестве наихудших условий с учетом [16] рассматриваются:

- максимальная скорость надвига V_H^{\max} ;
- минимальная длина отцепа по осям автосцепок $L_{\text{ОТЦ}}^{\min}$, принимаемая равной одной условной единице длины, то есть 14 м (по стандартной длине полувагона);
- минимальная протяженность $L_{\text{РТК}}^{\min}$ зоны действия МП РТК, равная максимальному расстоянию $S_{\text{П}}^{\max}$, проходимому МП РТК в прямом направлении, и получаемая при нулевой начальной ординате МП РТК при V_H^{\max} .

В качестве параметров при решении задачи проектирования РТК рассматриваются:

- максимальная скорость V_{max} каретки МП, км/ч;
- ускорение a МП РТК, м/с²;
- время t_3 задержки на начало движения МП РТК после ее стоянки/остановки, с;

- максимальное число N_{\max} правильно сформированных отцепов, шт.;
- максимальная скорость V_{H}^{\max} надвига, км/ч;
- максимальная, с учетом местных условий, протяженность M зоны действия МП РТК, м;
- установленная вероятность $P_{\text{ОШ}}$ ошибки (пропуска автосцепки, подлежащей расцепке, при условии что фактическая скорость надвига является величиной постоянной и соответствует максимальной);
- минимальная длина $L_{\text{ОТЦ}}^{\min}$ отцепов по осям автосцепок, м.

Задача проектирования РТК при этом заключается в определении такой совокупности параметров $\{V_{\max}, a, t_3\}$, которая обеспечивает наибольшую возможную величину N_{\max} при заданных $\{V_{\text{H}}^{\max}, M, P_{\text{ОШ}}, L_{\text{ОТЦ}}^{\min}\}$.

Основные положения предлагаемой методики проектирования

Первый этап предлагаемой методики включает в себя выполнение проектно-изыскательских работ, направленных на получение такой информации, как:

- количество и взаимное расположение путей надвига; ширина основной площадки земляного полотна; план и профиль пути в границах путей надвига, предполагаемых к оборудованию РТК;
- планы и рабочие чертежи с указанием мест и особенностей размещения путевого оборудования в границах предполагаемой зоны размещения РТК (светофоры, путевые ящики, путевые шкафы, муфты, стрелочные приводы, их гарнитуры, опоры контактной сети и иные объекты, ограничивающие размещение инфраструктуры РТК, включая его мобильную платформу), кабельных сетей, маршрутов служебного прохода;
- параметры существующей электропитающей установки поста электрической централизации или иного источника электрического питания оборудования на сортировочной горке;
- сведения о существующих средствах организации информационного взаимодействия с внешними модулями и системами, в частности о средствах обеспечения защищенного соединения, имеющих существенное значение для реализации подсистемы управления РТК [17] (вопросы организации информационного взаимодействия РТК в рамках проекта «Цифровая железнодорожная станция» регламентируются в документах [18, 19]);
- сортировочные листки, содержащие сведения о формируемых на горке отцепах;
- предполагаемые максимальные скорости надвига и роспуска составов с горки;
- характеристики окружающей среды, в частности погодно-климатические факторы, применяемые средства снегоборьбы и др.

Второй этап включает в себя анализ полученных исходных данных для определения ограничений, связанных с размещением инфраструктуры РТК, ее обслуживанием, ремонтом, функционированием. Должны быть определены:

- предельно допустимые по местным условиям границы зоны размещения инфраструктуры РТК;
- предельно допустимые по местным условиям границы зоны технического обслуживания оборудования РТК;
- маршруты служебного прохода к зоне технического обслуживания оборудования РТК, соответствующие ограждения и средства сигнализации;
- трассы прокладки кабельной сети для энергоснабжения и организации информационного взаимодействия РТК.

На основе анализа сортировочных листков определяется максимальное число подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок, которые могут быть сформированы с использованием РТК при максимальной скорости надвига. Определение осуществляется путем подсчета частоты возникновения последовательности из N подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок. Количество $N_{\text{сл}}$ сортировочных листков (необходимый объем выборки), достаточное для замены вероятности события ее частотой, следует определять известными методами при заданном уровне ошибки [20]. Фрагмент результатов анализа сортировочных листков на примере станции Челябинск-Главный показан в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Форма регистрации результатов анализа сортировочных листков

№ п/п	Дата выпуска ДД.ММ.ГГГГ	Идентификатор сортировочного листка (номер поезда)	Количество вагонов в составе, шт.	Количество отцепов в составе, шт.	Количество последовательностей из подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок, шт. с числом отцепов					
					2	3	4	...	9	> 9
1	2	3	4	5	6	7	8	...	13	14
1	21.01.2024	297004	82	18	2	0	0	...	0	0
2	22.01.2024	297025	64	26	4			...	0	0
...
600	26.01.2024	297736	60	34	3	1	1	...	0	1
ИТОГО					272	11	48	...	0	9
Всего последовательностей из подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок					491					

На основе результатов анализа полученной выборки заполняют табл. 2. Общее число последовательностей в анализируемых сортировочных листках для иных видов должно быть найдено как разность суммарного числа отцепов в рассмотренных составах и суммарного числа подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок.

ТАБЛИЦА 2. Форма регистрации результатов анализа числа последовательностей подряд идущих отцепов

i	Последовательность с числом отцепов K	Общее число последовательностей в анализируемых сортировочных листках N_i	Относительная частота появления последовательности с числом отцепов
1	2	272	0,079
2	3	119	0,034
3	4	48	0,014
4	5	17	0,005
5	6	26	0,008
6	7	0	0,000
7	8	0	0,000
8	9	0	0,000
9	> 9	9	0,002
10	Иная последовательность	2959	0,858
ИТОГО		3450	1,000
Всего отцепов в рассмотренных составах N			3450

На основании полученных в табл. 2 результатов строится гистограмма распределения частоты появления в сортировочном листке последовательности подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок, состоящей из K отцепов. Пример гистограммы, полученной на основе анализа сортировочных листов для станции Челябинск-Главный, показан на рис. 1. Приведенные результаты согласуются с ранее опубликованными результатами статистического анализа числа вагонов в отцепках [21].

С использованием гистограммы определяют максимальное количество отцепов минимальной длины, которое при выбранной максимальной скорости надвига сможет сформировать РТК. Для этого задается значение порога суммарной частоты появления в сортировочном листке последовательности отцепов минимальной длины, состоящей из K отцепов. Выбор порога имеет важное значение в случаях, когда имеются ограничения на размещение направляющей МП РТК и расстояние, проходимое кареткой МП РТК в прямом направлении, больше, чем расстояние, проходимое ею в обратном направлении между двумя соседними операциями по расцепке автосцепок. Порог выбирается в том числе с учетом желаемой вероятности осуществления правильного формирования всех отцепов в такой последовательности на максимальной выбранной скорости надвига.

Пусть выбранный уровень вероятности правильного (без единой ошибки) формирования всех отцепов в произвольной последовательности равен 0,99. Тогда

вероятность $P_{\text{ош}}$ ошибки при формировании всех отцепов в последовательности равна 0,01. С учетом этого на гистограмме (рис. 1) в одних осях строится кривая, соответствующая относительной частоте появления последовательности с числом отцепов K нарастающим итогом (направление оси абсцисс при этом выбрано противоположным гистограмме), а также уровень заданной вероятности ошибки при формировании всех отцепов в последовательности. Столбец, над которым пересекаются две построенные линии, соответствует выбранному для данной вероятности максимальному числу N_{max} подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок, которые могут быть сформированы при выбранной максимальной скорости надвига без ошибки (пропуска автосцепки, подлежащей расцепке) — в рассмотренном примере $N_{\text{max}} = 6$. При этом делается допущение, что величины ошибок первого и второго рода для системы технического зрения при решении ею задач позиционирования манипулятора и регистрации выполнения расцепки пренебрежимо малы.

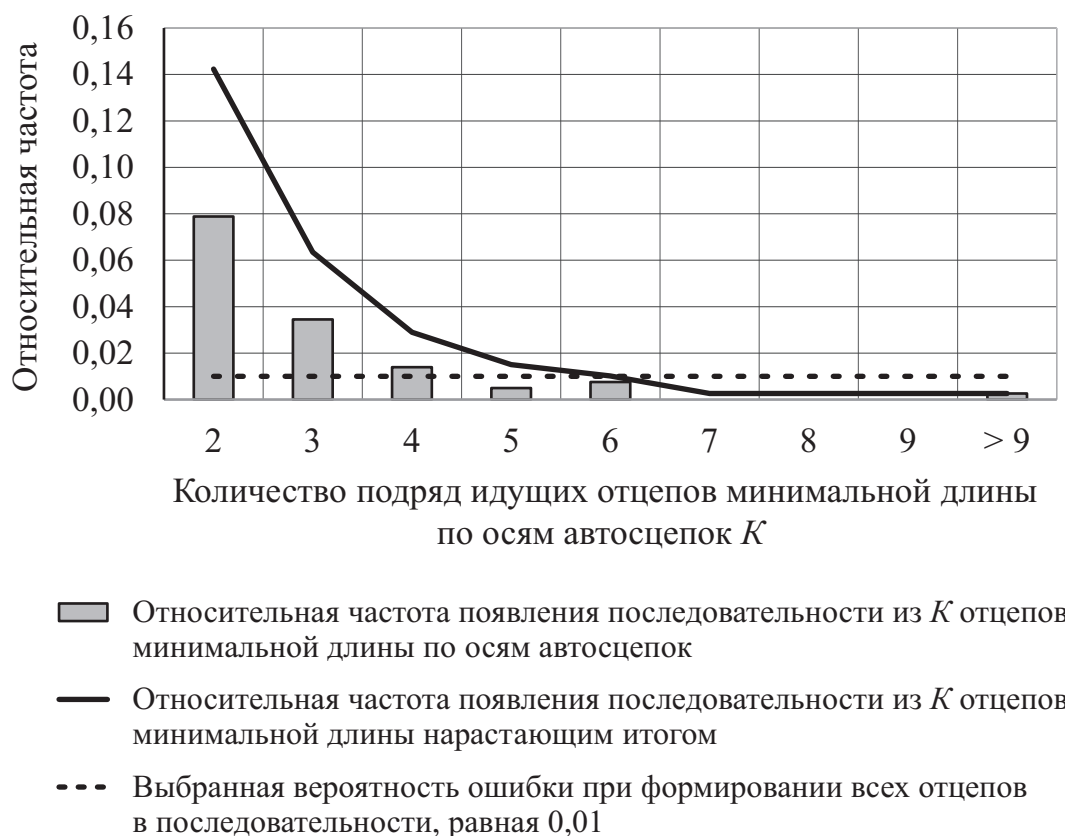


Рис. 1. Гистограмма распределения частоты появления в сортировочном листке последовательности из K отцепов минимальной длины

При необходимости использования в расчетах максимального числа подряд правильно выполненных расцепок автосцепок для последовательности отцепов минимальной длины полученное значение N_{max} следует увеличить на единицу.

Третий этап методики проектирования подразумевает выбор вариантов реализации РТК с учетом ограничений на размещение соответствующей инфраструктуры. Такой выбор осуществляется с использованием табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Форма регистрации результатов определения технико-эксплуатационных характеристик РТК

V_H^{\max} , км/ч	M , м	N_{\max} , шт.	№ п/п	V_{\max} , км/ч	a , м/с ²	t_{PH2} , с	Вар. движ. МП РТК	$S_{\text{пл}}$, м	$L_{\text{РТК}}^{\min}$, м	$S_{\text{Оmax}}$, м	N'_{\max} , шт.	$L_{\text{РТК}}^{\Phi}$, м	$\Delta S_{\text{Д}}$, м	Прим.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	100	6	1	15	3	6	от моб. дат.	26	26	49	3	2	–	Превышены границы зоны РТК
			2	15	3	6	от стац. дат.	20	20	22	6	–	1,84	–
			3	20	3	6	от моб. дат.	27	27	52	2	250	–	Превышены границы зоны РТК
			4	20	3	6	от стац. дат.	20	20	24	6	–	1,84	–

В столбце 1 указывают максимальную скорость V_H^{\max} надвига, полученную на этапах сбора и анализа исходных данных. В столбце 2 указывается максимально возможная протяженность M зоны действия МП РТК исходя из результатов анализа исходных данных. В столбце 3 указывается максимальное количество подряд идущих, правильно формируемых отцепов N_{\max} минимальной длины по осям автосцепок. В столбце 4 указывают номер по порядку варианта выполнения РТК. В столбцах 5–7 записываются значения максимальной скорости каретки МП РТК V_{\max} , ее ускорения a и общего времени выполнения операций с использованием манипулятора t_{PH2} соответственно.

При этом следует учитывать, что $V_{\max} > V_H^{\max}$, если МП РТК начинает движение по информации от возимого датчика, устанавливаемого на МП (например, системы технического зрения), и $V_{\max} \geq V_H^{\max}$, если МП РТК начинает движение по

информации от стационарного путевого датчика (например, датчика счета осей). Данные, записываемые в столбцах 5–7, могут быть взяты достаточно точно при известных типах и параметрах приводов МП, самих МП и приводов манипуляторов РТК или могут быть спрогнозированы, в случае когда такие приводы МП, сами МП или приводы манипуляторов РТК находятся в стадии разработки. Если параметры заранее неизвестны, то следует придерживаться следующей рекомендации: при прочих равных большие значения V_{\max} и a , а также меньшие t_{PH2} будут позволять увеличить фактическое количество подряд правильно выполненных отцепов N'_{\max} минимальной длины по осям автосцепок при одной и той же фактической протяженности $L_{\text{РТК}}^{\Phi}$ зоны действия МП РТК.

Вариант движения МП РТК указывают в столбце 8. В столбцах 9–10 указывают расстояние $S_{\text{Пм}}$, проходимое МП РТК в прямом направлении (в направлении движения надвигаемого состава), и минимальную протяженность $L_{\text{РТК}}^{\min}$ зоны действия МП РТК; при этом $S_{\text{Пм}} = L_{\text{РТК}}^{\min}$. Расчет $S_{\text{Пм}}$ осуществляется с использованием формулы (1):

$$S_{\text{Пм}} = V_{\max} t_{\text{PH1}} + at_{\text{P}} t_{\text{T1}} + V_{\text{H}}^{\max} (t_{\text{PH2}} + t_{\text{T2}}) + \frac{a(t_{\text{P}}^2 - t_{\text{T1}}^2 - t_{\text{T2}}^2)}{2}, \quad (1)$$

где V_{\max} — максимальная скорость МП РТК;

V_{H}^{\max} — максимальная скорость надвига;

t_{P} — время разгона МП РТК до некоторой фактической скорости $V \leq V_{\max}$;

t_{PH1} — время равномерного движения МП РТК с максимальной скоростью V_{\max} (если фактическая скорость МП РТК $V < V_{\max}$, то приравнивается к нулю);

t_{T1} — время торможения от некоторой фактической скорости V до скорости надвига V_{H}^{\max} ;

t_{PH2} — время равномерного движения МП РТК со скоростью надвига V_{H}^{\max} (равно времени выполнения технологических операций по переводу манипулятора РТК из транспортировочного положения в рабочее, позиционирования манипулятора, выполнения действий с цепью автосцепного устройства, перевод манипулятора из рабочего в транспортировочное положение; такое время определяется типом привода манипулятора и точностью его позиционирования);

t_{T2} — время торможения от V_{H}^{\max} до нуля.

Далее для каждого набора исходных данных выполняется сравнение результатов, записанных в столбцах 2 и 10. Если выполняется условие $L_{\text{РТК}}^{\min} > M$, то такие варианты далее не рассматриваются и в графе 15 приводится примечание: «Превышены границы зоны РТК», а в графах 11–14 ставятся прочерки.

Если $L_{\text{РТК}}^{\min} \leq M$, то далее в графе 11 записывают результат расчета минимального расстояния, проходимого МП РТК в обратном направлении $S_{\text{Ом}}$. Расчет $S_{\text{Ом}}$ осуществляют по формуле (2) с использованием значений временных параметров, получаемых по формулам (3), (4):

$$S_{\text{Oм}} = at_{\text{PO}}^2 + V_{\text{max}}t_{\text{PHO}}, \quad (2)$$

$$t_{\text{PO}} = \begin{cases} -\frac{V_{\text{H}}^{\Phi}}{a} + \sqrt{\left(\frac{V_{\text{H}}^{\Phi}}{a}\right)^2 + P_1 Q_1}, & \text{если } \left(\frac{Q_1 - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}}\right) = 0, \\ \frac{V_{\text{max}}}{a}, & \text{если } \left(\frac{Q_1 - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}}\right) > 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$t_{\text{PHO}} = \frac{X_1 - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}}, \quad (4)$$

где t_{PO} — время разгона МП РТК при движении в обратном направлении;
 t_{PHO} — время равномерного движения МП РТК в обратном направлении, с ($t_{\text{PHO}} \geq 0$);

$$P_1 = \begin{cases} \frac{1}{a}, & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} \geq X_{\text{H}}^{i+1}, \\ \frac{2}{a}, & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} < X_{\text{H}}^{i+1}; \end{cases}$$

$$P_2 = \begin{cases} \frac{V_{\text{max}}}{a} [V_{\text{max}} - 2V_{\text{H}}^{\Phi}], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} \geq X_{\text{H}}^{i+1}, \\ \frac{V_{\text{max}}}{2a} [V_{\text{max}} + 2V_{\text{H}}^{\Phi}], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} < X_{\text{H}}^{i+1}; \end{cases}$$

$$Q_1 = \begin{cases} L_{\text{Omin}} - V_{\text{H}}^{\Phi} \left[t_3 + \frac{V_{\text{H}}}{2a} \right], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} \geq X_{\text{H}}^{i+1}, \\ L_{\text{Omin}} - V_{\text{H}}^{\Phi} \left[t_3 + \frac{V_{\text{H}}}{2a} + \Delta t \right], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} < X_{\text{H}}^{i+1}; \end{cases}$$

$X_{\text{РТК}}^{i+1}$ — ордината будущей остановки мобильной платформы РТК;

X_{H}^{i+1} — ордината местонахождения автосцепки, подлежащей расцепке, в момент будущей остановки мобильной платформы;

t_3 — время задержки на начало движения МП РТК после ее стоянки/остановки (учитывает потери времени на срабатывания датчиков обнаружения автосцепки, передачу информации, в том числе управляющих сигналов, на коммутацию силовых цепей привода МП РТК и т. п.);

L_{Omin} — минимальная возможная длина отцепа (14 м).

В столбце 12 указывают фактическое количество подряд правильно выполненных отцепов N'_{max} минимальной длины по осям автосцепок при протяженности

зоны действия МРТК, равной M . Такое значение получают с использованием имитационного моделирования, поскольку формулы (1)–(4) не учитывают данный параметр, величина которого определяется местными условиями. Влияние такого ограничения на функционирование МП РТК в случае отсутствия путевого датчика показано с помощью зависимостей, приведенных на рис. 2–6 и полученных с использованием моделей, описанных в [16].

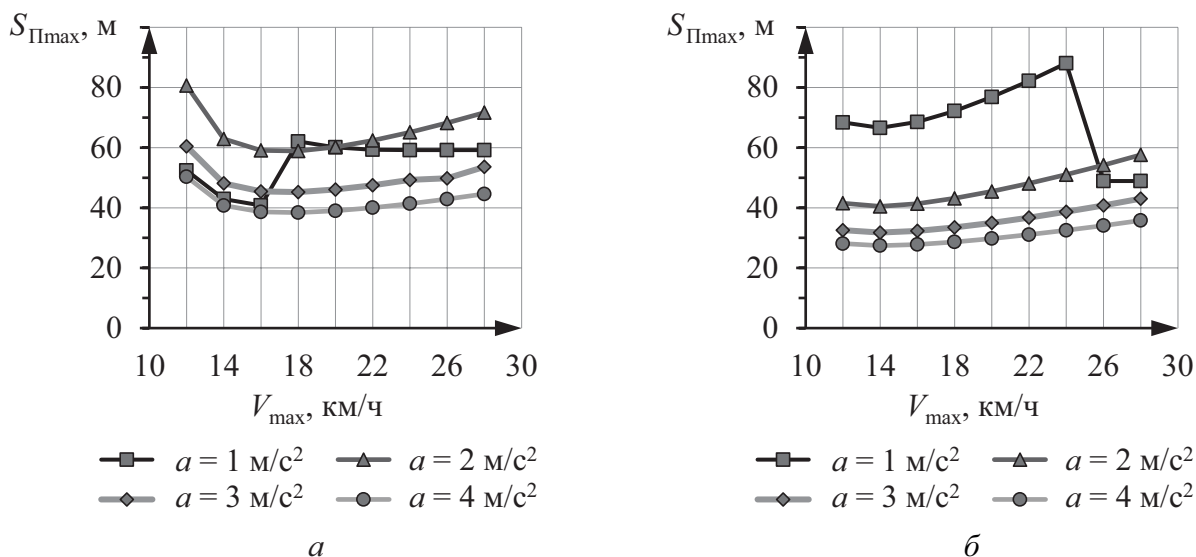


Рис. 2. Графики зависимостей максимального расстояния $S_{Пmax}$, проходимого кареткой МП РТК в направлении надвига, от максимальной ее скорости V_{max} при постоянной скорости надвига, равной: a — $V_H = 10 \text{ км/ч}$; $б$ — $V_H = 8 \text{ км/ч}$

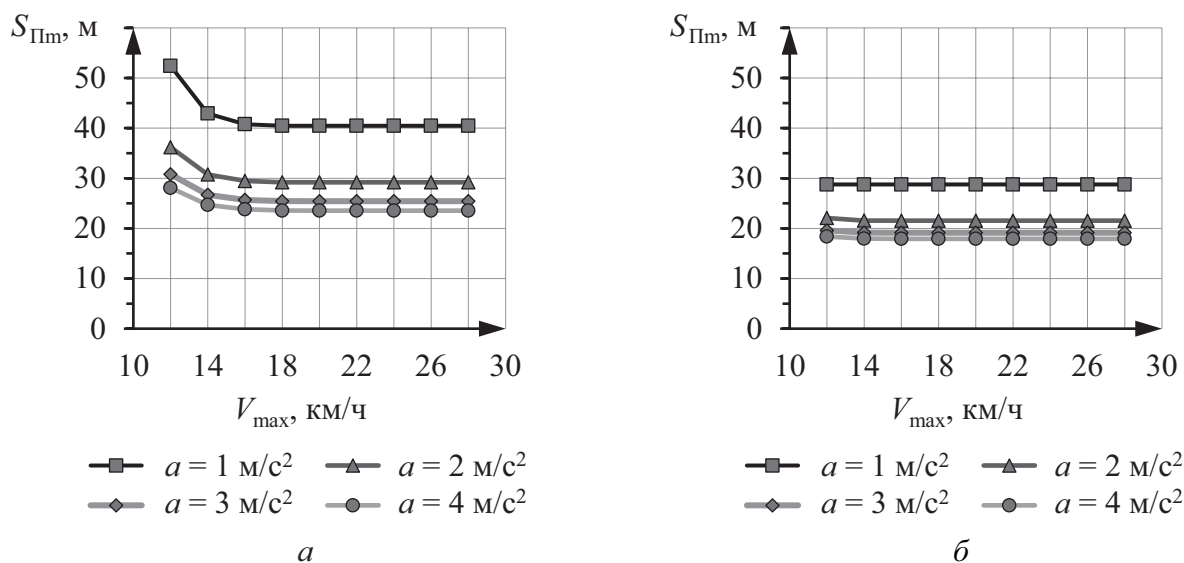


Рис. 3. Графики зависимостей минимального расстояния $S_{Пmin}$, проходимого кареткой МП РТК в направлении надвига, от максимальной ее скорости V_{max} при постоянной скорости надвига, равной: a — $V_H = 10 \text{ км/ч}$; $б$ — $V_H = 8 \text{ км/ч}$

Зависимости получены для случая, когда $t_3 = 0,2$ с, $t_{PH2} = 6$ с, $M = 100$ м. Характер полученных зависимостей объясняется необходимостью пропуска автосцепок, подлежащих расцепке, в условиях постоянной максимальной скорости надвига, из-за того, что расчетная ордината каретки МП РТК в момент окончания движения в направлении надвигаемого состава после выполнения очередной технологической операции будет находиться вне границ зоны действия МП РТК.

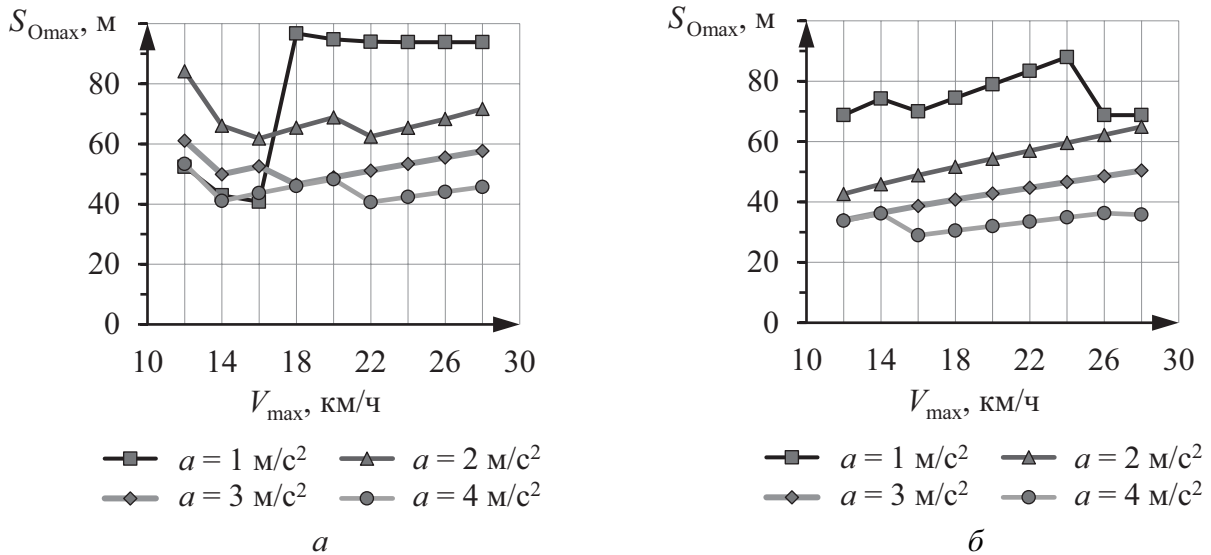


Рис. 4. Графики зависимостей максимального расстояния S_{Omax} , проходимого кареткой МП РТК в направлении, противоположном надвигу, от максимальной ее скорости V_{max} при постоянной скорости надвига, равной: а — $V_H = 10$ км/ч; б — $V_H = 8$ км/ч

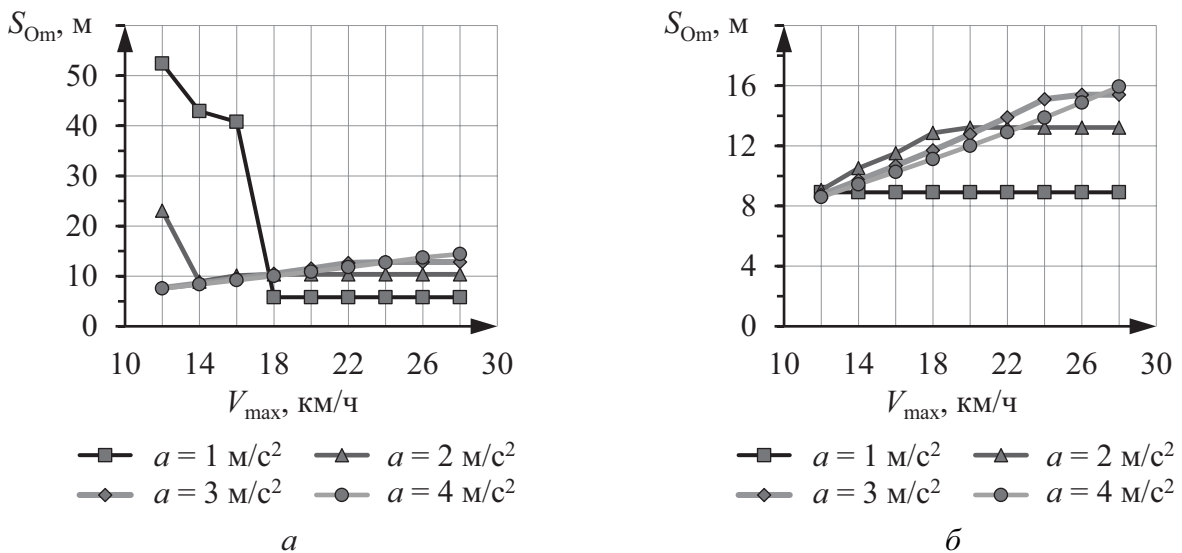


Рис. 5. Графики зависимостей минимального расстояния S_{Om} , проходимого кареткой МП РТК в направлении, противоположном надвигу, от максимальной ее скорости V_{max} при постоянной скорости надвига, равной: а — $V_H = 10$ км/ч; б — $V_H = 8$ км/ч

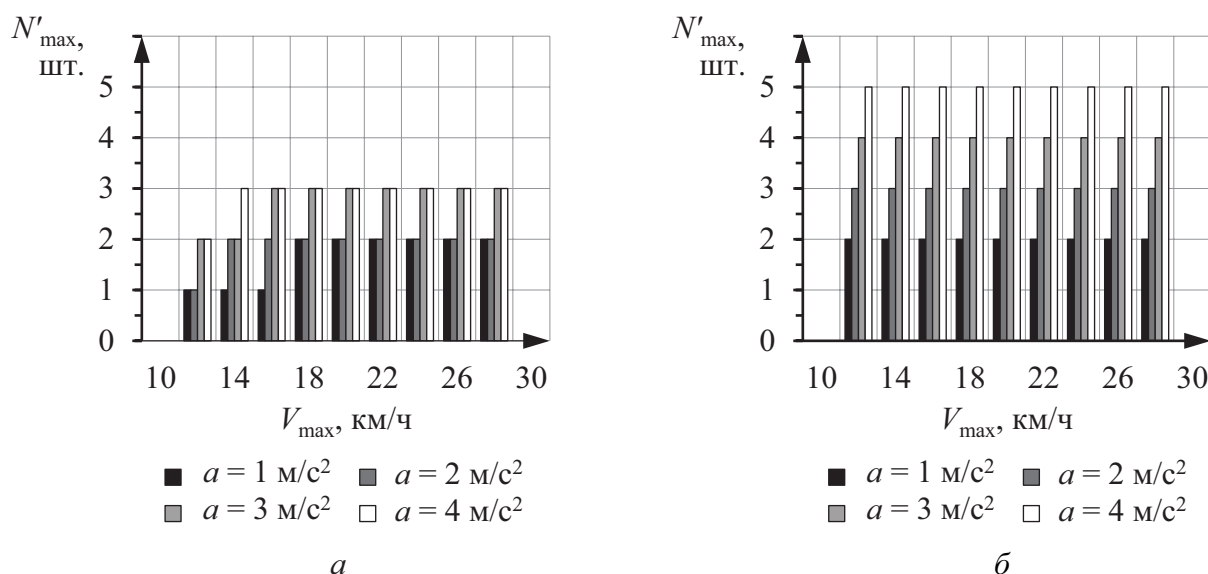


Рис. 6. Гистограммы, отражающие зависимость числа N'_{\max} правильно сформированных отцепов при наихудших условиях от максимальной скорости V_{\max} каретки МП РТК при постоянной скорости надвига, равной: *a* — $V_H = 10$ км/ч; *б* — $V_H = 8$ км/ч

Также следует отметить, что при наличии путевого датчика и реализации движения каретки МП РТК в точку, из которой необходимо начать равноускоренное движение к автосцепке, подлежащей расцепке, расстояние, проходимое в направлении надвига при наихудших условиях всегда одинаково ($S_{\text{Пmax}} = S_{\text{Пm}}$) и не зависит от величины V_{\max} .

Если полученное на основе результатов имитационного моделирования значение N'_{\max} менее указанного в столбце 3, далее осуществляют расчет фактической зоны действия МП РТК $L_{\text{РТК}}^\Phi$ с использованием формулы (5):

$$L_{\text{РТК}}^\Phi = N'_{\max} (S_{\text{Пmax}} - S_{\text{Om}}) + X_{\text{РТК}}^i + S_{\text{Пm}}. \tag{5}$$

Результат расчета записывают в столбце 13. Он может потребоваться для оценки потенциальной возможности реконструкции инфраструктуры вдоль пути надвига и соответствующей стоимости выполнения работ в случаях, когда ни один из вариантов реализации МП РТК, приведенных в табл. 3, не может быть реализован из-за несоответствия заданным эксплуатационным характеристикам.

Если для одних и тех же исходных данных (V_{\max} , a и t_{PH2}) выполняется условие $L_{\text{РТК}}^{\min} > M$, то такие варианты далее не рассматриваются, в графе 15 указывается примечание: «Превышены границы зоны РТК», а в графе 14 ставят прочерк. Если $L_{\text{РТК}}^{\min} \leq M$, то в графе 14 для случая начала движения МП РТК по данным от стационарного путевого датчика записывают результат расчета ординаты размещения такого датчика $\Delta S_{\text{д}}$. Расчет $\Delta S_{\text{д}}$ осуществляют с использованием формулы (6):

$$\Delta S_{\text{Д}} = V_{\text{Н}}^{\text{max}} \left[t_3 + \frac{V_{\text{Н}}^{\text{max}}}{2a} \right]. \quad (6)$$

Если движение МП РТК осуществляется по данным от возимого датчика, устанавливаемого непосредственно на МП РТК, то в графе 14 ставится прочерк. В графе 15 при необходимости указывают примечания, в которых, в частности, могут быть указаны типы приводов МП и манипулятора РТК, тип МП или иная необходимая для сравнения вариантов реализации РТК информация.

В результате заполнения табл. 3 определяют варианты реализации РТК, которые служат в качестве исходных данных при последующем их сравнении и выборе по стоимостному критерию.

Четвертый этап предлагаемой методики заключается в определении вариантов реализации РТК и сравнении их по стоимости выполнения (в случае тиражирования — адаптации существующих технических решений, стоимости монтажа и последующего обслуживания). К сравнению допускаются варианты реализации РТК, для которых в графе 15 табл. 3 не указано «Превышены границы зоны РТК». С учетом этого составляется табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Форма регистрации стоимости выполнения вариантов реализации РТК

$V_{\text{Н}}^{\text{max}}$, км/ч	M , м	N_{max} , шт.	№ п/п	V_{max} , км/ч	a , м/с ²	t_{PH2} , с	Вар. движ. МП РТК	$S_{\text{им}}$, м	$L_{\text{РТК}}^{\text{min}}$, м	$S_{\text{ом}}$, м	N'_{max} , шт.	$L_{\text{РТК}}^{\Phi}$, м	$\Delta S_{\text{Д}}$, м	Стоимость, млн руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	100	6	1	15	3	6	от стац. дат.	20	20	22	6	–	1,84	А
			2	20	3	6	от стац. дат.	20	20	24	6	–	1,84	Б

В столбце 15 указывают стоимость выполнения РТК по варианту технико-эксплуатационных характеристик, перечисленных в столбцах 1–14, в млн руб. Варианты реализации РТК при этом ранжируются по стоимости. При прочих равных вариант реализации РТК № 1 в приведенном примере является предпочтительным ввиду выполнения условия $A > B$.

По требованию заказчика может быть установлен порог стоимости выполнения РТК. В таком случае далее к анализу функционирования принимаются те варианты технико-эксплуатационных характеристик РТК, для которых стоимость выполнения ниже или равна установленному порогу.

Пятый этап предлагаемой методики проектирования предполагает осуществление имитационного моделирования функционирования РТК для определения критических режимов его работы, при которых фактическая скорость надвига должна быть ниже установленного значения V_{\max} . Имитационное моделирование осуществляют для выбранных на четвертом этапе наборов технико-эксплуатационных характеристик РТК с использованием известных математических моделей [16]. На основе результатов имитационного моделирования выбирается такой вариант, для которого вероятность пропуска автосцепки, подлежащей расцепке, при наихудших условиях окажется ниже. При необходимости выбор может быть осуществлен по паре критериев: стоимости выполнения и вероятности пропуска автосцепки, подлежащей расцепке. Также для вариантов реализации РТК возможным оказывается снижение затрат за счет сокращения протяженности зоны действия МП РТК: так, в рассмотренном примере для вариантов № 1 и № 2 по табл. 4 возможно без снижения N'_{\max} сократить протяженность $L_{\text{РТК}}^{\Phi}$ зоны действия МП РТК до 91 м.

Кроме того, на основе результатов моделирования формулируются рекомендации по снижению скорости надвига в случаях, когда в составе присутствуют последовательности подряд идущих отцепов минимальной длины по осям автосцепок с числом отцепов больше установленного в рамках второго этапа проектирования значения N_{\max} .

Заключение

В исследовании сформулированы методические основы проектирования РТК для расформирования составов на сортировочной горке. Получены следующие основные результаты:

1. Определены пять основных этапов проектирования. Цель первого этапа — сбор наиболее полной информации об объекте размещения РТК и требованиях к параметрам технологического процесса, в котором предполагается осуществлять использование РТК. Цель второго этапа — анализ полученных исходных данных, определение перечня ограничений к инфраструктуре РТК, а также ограничений реализации технологического процесса с использованием разрабатываемого или проектируемого РТК. Третий этап представляет собой определение возможных с технической точки зрения при заданных ограничениях со стороны существующей инфраструктуры вариантов выполнения РТК с учетом результатов имитационного моделирования. Четвертый этап позволяет определить наиболее целесообразные с экономической точки зрения варианты выполнения РТК либо путем сравнения стоимости выполнения варианта РТК с предельной стоимостью, либо путем ранжирования вариантов по стоимости их выполнения. Цель пятого варианта — определить возможные ограничения применения РТК в реальных условиях из-за допущений, принятых при проектировании.

В результате проводимого на данном этапе имитационного моделирования формируются рекомендации по разработке и проектированию РТК, учету особенностей его применения в реальном технологическом процессе. На основе результатов имитационного моделирования получен ряд характерных зависимостей, позволяющих оценить количество подряд правильно сформированных отцепов при наихудших условиях.

2. Особенностью предлагаемых методологических основ являются возможность обоснованного выбора варианта выполнения РТК на этапе проектирования, а также учет влияния особенностей выполнения РТК на реализацию технологического процесса роспуска составов на сортировочной горке.

В последующем предложенные подходы должны лечь в основу методических указаний по разработке и проектированию РТК, предназначенных для расформирования составов на сортировочной горке.

Список источников

1. Долгий А. И. Технологии интенсивного развития ОАО «РЖД» — эффективный ответ на современные вызовы // Железнодорожный транспорт. 2025. №7. С. 6–15.
2. Андреев В. Е. Трансформация производственных процессов в эпоху цифровых технологий // Железнодорожный транспорт. 2025. №9. С. 4–6.
3. Концепция «Цифровая железнодорожная станция»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 07.11.2018 № 1049 (в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 05.06.2020 № 1217/р).
4. Долгий А. И. Цифровая железнодорожная станция как ключевой элемент повышения эффективности перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. 2025. №9. С. 7–11.
5. Цифровая железнодорожная станция — от концепции к реальному внедрению / В. Е. Андреев [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2023. №9. С. 2–6. DOI: 10.34649/AT.2023.9.9.001
6. Роботизация как элемент цифровой трансформации / В. В. Кудюкин [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2022. №5. С. 19–23.
7. Кудюкин В. В. Роботизация как необходимый элемент повышения эффективности процесса железнодорожных перевозок // Транспорт Российской Федерации. 2023. №1–2 (104–105). С. 13–16.
8. Охотников А. Л., Зажигалкин А. В. Обзор ключевых технологий робототехники // Проблемы искусственного интеллекта. 2025. №1 (36). С. 141–155. DOI: 10.24412/2413-7383-141-155
9. Озеров А. В., Бочков А. В. Текущее состояние и перспективы мировых исследований в области интеллектуального железнодорожного транспорта // Интеллектуальный транспорт. 2025. Т. 9, №2 (34). С. 43–66.
10. Устройство для автоматического расцепления автосцепок движущихся вагонов: патент №2410262. Российская Федерация, МПК В61G 7/04 / Москвичев О. В., Суетин В. В., Кузнецов А. Г. [и др.]; заявл. 24.11.2009; опубл. 27.01.2011. Бюл. №3.

11. Промышленный робот для автоматического расцепления движущихся грузовых вагонов: патент на полезную модель №208417. Российская Федерация, МПК В61G 7/04 / Садуев Р. Р.; заявл. 21.07.2021; опубл. 17.12.2021. Бюл. № 35.

12. Устройство для автоматического расцепления вагонов движущихся поездов: патент №2700208. Российская Федерация, МПК В61G 7/04 / Панин Ю. А., Матях Д. И.; заявл. 19.11.2018; опубл. 13.09.2019. Бюл. № 26.

13. Способ автоматического расцепления автосцепок движущихся вагонов и устройство его осуществления: патент №2728968 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04 / Зайков В. Н.; заявл. 16.10.2019; опубл. 03.08.2020. Бюл. № 22.

14. Система авторасцепки вагонов на сортировочной горке: патент №2450946 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04 / Свердлов В. Б., Акмалов С. Г., Иргер Г. Ю.; заявл. 14.12.2010; опубл. 20.05.2012. Бюл. № 14.

15. Яшин В. Н. Особенности разработки автоматизированных информационных систем с учетом показателей их эффективности // Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции (Стерлитамак, 23–25 мая 2019 года) / отв. ред. А. Л. Галиев. Т. I. Стерлитамак: Башкирский государственный университет, 2019. С. 618–623.

16. Кудюкин В. В., Вуколов А. В., Кузьмин В. С. Имитационное моделирование работы робототехнических комплексов, предназначенных для расформирования составов на сортировочных горках // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 1. С. 16–29. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-16-29

17. Кудюкин В. В., Кукушкин С. С., Хакиев З. Б. Создание устойчивых и безопасных каналов передачи информации для управления робототехническими комплексами // Труды АО «НИИАС»: сборник статей. Т. 2, вып. 11. М.: Т8 Издательские технологии, 2021. С. 209–215.

18. Описание IT-архитектуры проекта «Цифровая железнодорожная станция»: утв. зам. генерального директора ОАО «РЖД» Е. И. Чаркиным от 23.12.2024 №2570. 62 с.

19. Регламент межмашинного взаимодействия при протоколировании (документировании) технологических операций на цифровой железнодорожной станции: утв. зам. генерального директора — главным инженером ОАО «РЖД» В. Ф. Танаевым от 22.09.2025. №1659. 204 с.

20. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник для вузов. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.

21. Хаджимухаметова М. А. Оценка влияния характера отцепов на перерабатывающую способность сортировочных горок // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. Т. 3, № 1. С. 185–191.

Дата поступления: 20.02.2026

Решение о публикации: 09.04.2026

Контактная информация:

КУДЮКИН Владимир Валерьевич — заместитель генерального директора; v.kudukin@vniias.ru

КУЗЬМИН Владислав Сергеевич — кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник;

vs.kuzmin@vniias.ru

Methodology for Designing Robotic Systems for Parallel Train Break-Up on Automated Humps

V. V. Kudyukin, V. S. Kuz'min

JSC Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport (JSC NIIAS), bldg. 1, 27 Nizhegorodskaya st., Moscow, 109029, Russia

For citation: Kudyukin V. V., Kuz'min V. S. Methodology for Designing Robotic Systems for Parallel Train Break-Up on Automated Humps // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 86–104. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-86-104 (In Russian)

Abstract

Objective: to examine the design issues of robotic complexes intended for parallel train break-up on automated humps (hereinafter referred to as RTC — Robotic Technological Complex) under constraints imposed by the placement of corresponding infrastructure along the push track, as well as the uneven lengths of formed cuts. To demonstrate the necessity of considering, within the design process, the characteristics and performance quality indicators of RTC established based on simulation modeling results under worst-case conditions. **Methods:** include analysis of scientific and technical literature dedicated to issues of structural selection, design, and modeling of RTC operation; simulation modeling to determine the operational parameters of the robotic complex's mobile platform. **Results:** a methodology for designing RTC has been developed, comprising five main stages: collection and processing of primary data about the implementation object and proposed technical means; selection of implementation options considering constraints on infrastructure placement; selection of implementation options based on cost criteria and their simulation modeling to determine the maximum number of correctly consecutively formed cuts under worst-case conditions: maximum push speed, minimum cut length between automatic coupler axes, and minimum operational zone length of the mobile platform. **Practical importance:** the proposed methodology allows for selecting an RTC configuration that ensures a specified level of error probability in forming consecutively listed cuts of minimum length in the sorting list, taking into account constraints imposed by local conditions.

Keywords: marshaling yard, hump, robotic complex, train break-up from hump, design

References

1. Dolgij A. I. *Texnologii intensivnogo razvitiya OAO "RZhD" — e'ffektivny`j otvet na sovremenny`e vy`zovy`* [Russian Railways' Intensive Development Technologies — An Effective Response to Modern Challenges], *Zheleznodorozhny`j transport [Railway Transport]*, 2025, iss. 7, pp. 6–15. (In Russian)
2. Andreev V. E. *Transformaciya proizvodstvenny`x processov v e`poxu cifrovny`x texnologij* [Transforming Manufacturing Processes in the Digital Age], *Zheleznodorozhny`j transport [Railway Transport]*, 2025, iss. 9, pp. 4–6. (In Russian)
3. *Kontseptsiya "Tsifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya"* [Concept "Digital Railway Station"]: approved by order of JSC "Russian Railways" dated November 7, 2018 no. 1049: as amended by order of JSC "Russian Railways", dated June 5, 2020, no. 1217/r]. (In Russian)
4. Dolgij A. I. *Cifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya kak klyuchevoj e`lement povy`sheniya e`ffektivnosti perevoznogo processa* [Digital Railway Station as a Key Element in Improving the Efficiency of the Transportation Process], *Zheleznodorozhny`j transport [Railway Transport]*, 2025, iss. 9, pp. 7–11. (In Russian)

5. Andreev V. E., et al. Cifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya — ot koncepcii k real`nomu vnedreniyu [Digital Railway Station — from Concept to Real Implementation], *Avtomatika, svyaz`, informatika [Automation, Communications, Information Technology]*, 2023, iss. 9, pp. 2–6. (In Russian)
6. Kudyukin V. V., et al. Robotizatsiya kak e`lement cifrovoj transformatsii [Robotization as an Element of Digital Transformation]. *Zheleznodorozhny`j transport [Railway Transport]*, 2022, iss. 5, pp. 19–23. (In Russian)
7. Kudyukin V. V. Robotizatsiya kak neobxodimy`j e`lement povy`sheniya e`ffektivnosti processa zheleznodorozhny`x perevozok [Robotization as a Necessary Element for Enhancing the Efficiency of Railway Transportation Process], *Transport Rossijskoj Federacii [Transport of the Russian Federation]*, 2023, iss. 1–2 (104–105), pp. 13–16. (In Russian)
8. Oxotnikov A. L., Zazhigalkin A. V. Obzor klyuchevy`x tekhnologij robototexniki [Overview of Key Technologies of Robotics], *Problemy` iskusstvennogo intellekta [Problems of Artificial Intelligence]*, 2025, iss. 1 (36), pp. 141–155. (In Russian)
9. Ozerov A. V., Bochkov A. V. Tekushhee sostoyanie i perspektivy` mirovy`x issledovanij v oblasti intellektual`nogo zheleznodorozhnogo transporta [The Current State and Prospects of Global Research in the Field of Intelligent Railway Transport], *Intellektual`ny`j transport [Intelligent Transport]*, 2025, vol. 9, iss. 2 (34), pp. 43–66. (In Russian)
10. Patent no. 2410262, Russian Federation, IPC B61G 7/04, Ustrojstvo dlya avtomaticheskogo rastsepleniya avtostsepok dvizhushchikhsya vagonov [Device to Automatically Disconnect Running Car Automatic Couplers], O. V. Moskvichev, et al: appl. November 24, 2009: publ. January 27, 2011, bul. no. 3. (In Russian)
11. Patent no. 208417, Russian Federation, IPC B61G 7/04, Promyshlennyj robot dlya avtomaticheskogo rastsepleniya dvizhushchikhsya gruzovykh vagonov [Industrial Robot for Automatic Uncoupling of Moving Freight Wagons], R. R. Saduev: appl. July 21, 2021: publ. 12/17/2021, bul. no. 35. (In Russian)
12. Patent no. 2700208, Russian Federation, IPC B61G 7/04, Ustrojstvo dlya avtomaticheskogo rastsepleniya vagonov dvizhushchikhsya poezdov [Device for Automatic Disengagement of Cars of Moving Trains], Yu. A. Panin, D. I. Matyax: appl. November 19, 2018: publ. September 13, 2019, bul. no. 26. (In Russian)
13. Patent no. 2728968, Russian Federation, IPC B61G 7/04, Sposob avtomaticheskogo rastsepleniya avtostsepok dvizhushchikhsya vagonov i ustrojstvo ego osushchestvleniya [Method for Automatic Disengagement of Automatic Couplings of Moving Cars and Device for Its Implementation], V. N. Zajkov: appl. October 16, 2019, publ. March 08, 2020, bul. no. 22. (In Russian)
14. Patent no. 2450946 Russian Federation, IPC B61G 7/04, Sistema avtorastsepki vagonov na sortirovochnoj gorke [Automatic System to Uncouple Cars on Hump Yard], V. B. Sverdlov, S. G. Akmalov, G. Yu. Irger: appl. December 14, 2010: publ. May 20, 2012, bul. no. 14. (In Russian)
15. Yashin V. N. Osobennosti razrabotki avtomatizirovanny`x informacionny`x sistem s uchetom pokazatelej ix e`ffektivnosti [Features of the Development of Automated Information Systems Taking into Account Their Performance Indicators], *Proceedings of Conference “Aktual`ny`e*

problemy` nauki i obrazovaniya v sovremennom vuze` [Current Issues of Science and Education in a Modern University], Sterlitamak, May 23–25, 2019, pp. 618–623. (In Russian)

16. Kudyukin V.V., et al. Imitacionnoe modelirovanie raboty` robototexnicheskix kompleksov, prednaznachenny`x dlya rasformirovaniya sostavov na sortirovochny`x gorkax [Simulation Modeling of the Robotic System Operations Designed for Parallel Train Break-Up on Automated Humps], *Avtomatika na transporte* [Transport Automation Research], 2025, vol. 11, iss. 1, pp. 16–29. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-16-29 (In Russian)

17. Kudyukin V.V., et al. Sozdanie ustojchivy`x i bezopasny`x kanalov peredachi informacii dlya upravleniya robototexnicheskimi kompleksami [Creation of Stable and Secure Information Transmission Channels for Control of Robotic Systems], *Trudy` AO "NIIAS": Sbornik statej* [Proceedings of JSC NIIAS: Collection of Articles], 2021, vol. 2, iss. 11, pp. 209–215. (In Russian)

18. Opisaniye IT-arkhitektury proekta "Tsifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya" [Description of the IT Architecture of the "Digital Railway Station" Project], approved by Deputy General Director of JSC "Russian Railways", E. I. Charkin, dated December 23, 2024, no. 2570, 62 p. (In Russian)

19. Reglament mezhmashinnogo vzaimodeystviya pri protokolirovanii (dokumentirovanii) tekhnologicheskikh operatsii na tsifrovoi zheleznodorozhnoi stantsii [Regulation on Machine-to-Machine Interaction During Logging (Documentation) of Technological Operations at a Digital Railway Station], approved by Deputy General Director — Chief Engineer of JSC "Russian Railways", V. F. Tanaev, dated September 22, 2025, no. 1659, 204 p. (In Russian)

20. Ventcel` E. S. Teoriya veroyatnostej [Probability Theory], Moscow, Vysshaya shkola [Higher School], 1999, 576 p. (In Russian)

21. Khadzhimukhametova M. A. Otsenka vliyaniya kharaktera otsepov na pererabatyvayushchuyu sposobnost` sortirovochnykh gorok [Assessment of the Influence of Cut Characteristics on the Processing Capacity of Sorting Humps], *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern Problems of the Russian Transport Complex], 2013, vol. 3, iss. 1, pp. 185–191. (In Russian)

Received: February 20, 2026

Accepted: April 9, 2026

Author's information:

Vladimir V. KUDYUKIN — Deputy General Director; v.kudukin@vniias.ru

Vladislav S. KUZ'MIN — PhD in Engineering, Leading Research Officer; vs.kuzmin@vniias.ru

УДК 656.25+621.316.9+621.315.1

Волновые процессы в высоковольтной линии автоблокировки 10 кВ при серийных ударах молнии

А. Д. Соловьёв

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Соловьёв А. Д. Волновые процессы в высоковольтной линии автоблокировки 10 кВ при серийных ударах молнии // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 105–117. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-105-117

Аннотация

Цель: исследование волновых процессов в высоковольтной линии автоблокировки 10 кВ при серийных ударах молнии с учетом накопления энергии и деградации ограничителей перенапряжений, а также оценка влияния этих факторов на эффективность молниезащиты линии. **Методы:** использованы математическое и численное моделирование во временной области, основанное на методе переменных состояний, с применением аналитического задания токов молнии (функция Хайдлера), динамической модели канала молнии и энергетически зависимой модели ограничителей перенапряжений. **Результаты:** показано, что при серийных ударах молнии волновые процессы в линии накладываются во времени, что приводит к увеличению уровней перенапряжений. Установлено, что энергия, рассеиваемая в ограничителях перенапряжений, накапливается от удара к удару и достигает предельных значений уже при нескольких воздействиях. Выявлено, что работоспособность ОПН определяется не только мгновенными параметрами импульсов, но и суммарной энергетической нагрузкой, приводящей к деградации и возможному отказу устройства. **Практическая значимость:** заключается в возможности использования разработанной модели для расчетного анализа серийных грозовых воздействий и оценки энергетической нагруженности ограничителей перенапряжений при проектировании систем молниезащиты высоковольтных линий автоблокировки. Полученные результаты позволяют обосновать необходимость учета накопительных эффектов и перехода к энергетически согласованным схемам защиты, включая применение защищенных подходов к объектам железнодорожной автоматики и телемеханики.

Ключевые слова: молния, серийные удары, волновые процессы, железнодорожная автоматика и телемеханика, энергетическая стойкость

Введение

Воздействие молнии на высоковольтные линии (ВЛ) автоблокировки (АБ), используемые для электроснабжения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), является одной из основных причин возникновения импульсных перенапряжений [1]. В работе [2] была разработана и верифицирована математическая модель трехфазной ВЛ АБ напряжением 10 кВ, позволяющая анализировать волновые процессы при одиночном ударе молнии во временной области с учетом распределенных параметров линии, межфазных электромагнитных связей, динамики канала молнии и работы ограничителей перенапряжения нелинейных (ОПН). Полученные результаты показали, что уровни волновых

перенапряжений существенно зависят от конфигурации линии и средств защиты и могут достигать максимальных значений в точках, удаленных от места приложения грозового воздействия.

В то же время реальные грозовые разряды, как правило, имеют серийный характер и состоят из последовательности возвратных ударов, следующих с малыми временными интервалами [3–4]. В таких условиях электромагнитные процессы, вызванные предыдущими импульсами, не успевают полностью затухнуть, а воздействие молнии на линию и подключенные защитные устройства приобретает накопительный характер. Анализ волновых процессов при одиночном ударе не позволяет корректно оценить эволюцию перенапряжений и нагрузку на защитные устройства при серийных грозовых воздействиях [5].

Особую роль при серийных ударах молнии играют ОПН, работа которых определяется не только мгновенными значениями напряжения и тока, но и суммарной энергией, рассеиваемой за время воздействия. Последовательное приложение нескольких импульсов может приводить к накоплению энергии, тепловой деградации ОПН и изменению условий формирования волновых процессов в линии при последующих ударах [6]. Данные эффекты принципиально не учитываются в моделях, ориентированных исключительно на одиночные грозовые импульсы, и требуют специального анализа [7].

В настоящей работе рассматривается задача исследования волновых процессов в ВЛ АБ 10 кВ при серийных ударах молнии с учетом накопительных эффектов в ОПН. Серийное грозовое воздействие моделируется в виде последовательности импульсов тока, прикладываемых к линии с заданными временными интервалами, при сохранении энергетического и электрического состояния системы между ударами. Математическая модель линии, основанная на методе переменных состояния и ранее верифицированная для одиночного удара, расширяется за счет учета накопления энергии и деградации ограничителей перенапряжений. Целью работы является анализ эволюции волновых перенапряжений и энергетической нагрузки ограничителей перенапряжений от удара к удару, а также оценка влияния серийных грозовых воздействий на эффективность молниезащиты линии автоблокировки.

Математическая модель серийных грозовых воздействий

Для анализа волновых процессов в ВЛ АБ 10 кВ при серийных ударах молнии используется математическая модель, основанная на методе переменных состояния, ранее выведенная и верифицированная для случая одиночного грозового воздействия. В рамках данной модели линия, источник грозового воздействия и защитные устройства рассматриваются как единая динамическая система, поведение которой описывается во временной области. В общем виде динамика системы представляется в компактной матричной форме:

$$M\dot{x}(t) = Ax(t) + b(t) + \varphi(x, t), \quad (1)$$

где $Ax(t)$ — линейный оператор, описывающий внутреннюю динамику линии и ее топологию;

$b(t)$ — вектор представления внешнего грозового воздействия;

$\varphi(x, t)$ — нелинейная функция, включающая вклад нелинейных и энергетических эффектов.

При переходе от одиночного удара к серийному базовая структура уравнения (1) сохраняется, а изменения касаются формы внешнего воздействия и состава вектора состояния.

Реальный грозовой разряд, как правило, представляет собой последовательность возвратных ударов, следующих с малыми временными интервалами [8]. Для формального описания такого воздействия в рамках временной модели ток молнии задается в виде суммы отдельных импульсов:

$$i_L(t) = \sum_{r=1}^{N_S} i_{H,r}(t - t_r), \quad (2)$$

где N_S — число ударов в серии;

$i_{H,r}(t)$ — временная зависимость тока r -го удара;

t_r — момент начала r -удара.

Такое представление позволяет рассматривать серию ударов как единый нестационарный процесс с сохранением внутренних состояний системы между импульсами.

При этом серия ударов в расчетной модели задается не только числом импульсов, но и совокупностью их временных и амплитудных параметров. К основным параметрам серии относятся число ударов m , амплитуда тока каждого удара $I_{p,r}$, постоянные времени фронта и спада $\tau_{1,r}$, $\tau_{2,r}$, показатель крутизны фронта n_r , а также моменты начала отдельных ударов t_r . Интервал между последовательными ударами определяется как $\Delta t_r = t_{r+1} - t_r$. Следовательно, влияние серийного грозового воздействия на линию определяется не только амплитудами отдельных импульсов, но и их взаимным расположением во времени, от которого зависит степень наложения волновых процессов.

Форма тока каждого отдельного удара аппроксимируется аналитической функцией Хайдлера [9]:

$$i_{H,r}(t) = I_p \cdot \frac{(t/\tau_{1,r})^{n_r}}{1 + (t/\tau_{1,r})^{n_r}} \cdot e^{-t/\tau_{2,r}}, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

где $I_{0,r}$ — амплитуда тока r -го удара;

$\tau_{1,r}$ — постоянная времени, определяющая крутизну фронта импульса молнии;

$\tau_{2,r}$ — постоянная времени, определяющая длительность спада импульса молнии;

n_r — показатель степени, задающий крутизну нарастания фронта тока;
 t — время с момента начала грозового разряда.

Использование данной аппроксимации позволяет воспроизводить характерные временные параметры возвратных ударов молнии [10].

В настоящей работе в качестве базового расчетного сценария принята серия из трех последовательных импульсов. Такой выбор обусловлен тем, что указанная последовательность является минимальной серией, позволяющей одновременно выявить два характерных эффекта: наложение волновых процессов в линии и накопление энергии в ограничителях перенапряжений от удара к удару. Первый импульс принят более энергоемким, а второй и третий импульсы заданы с меньшей длительностью хвоста, что отражает различие между первым и последующими ударами в составе грозового разряда. Интервал между импульсами, равный 40 мкс, рассматривается как неблагоприятный расчетный интервал, выбранный для анализа режима, при котором последующий импульс приходит до полного затухания переходного процесса от предыдущего воздействия.

Серийный ток молнии вводится в систему уравнений (1) через вектор внешних воздействий:

$$b(t) = b_0 + e_p i_L(t), \quad (4)$$

где b_0 — вектор постоянных внешних воздействий, связанных с граничными условиями линии;

e_p — единичный вектор, определяющий фазу и узел приложения грозового воздействия;

$i_L(t)$ — ток молнии.

Такая форма записи подчеркивает, что серийность удара отражается исключительно во временной зависимости внешнего воздействия.

Для более корректного описания взаимодействия источника грозового воздействия с линией в модель вводится динамическое представление канала молнии [11]. В этом случае ток канала рассматривается как дополнительная переменная состояния и определяется дифференциальным уравнением:

$$L_{ch} \frac{di_{ch}(t)}{dt} = u_{eq}(t) - R_{ch} i_{ch}(t) - u_m(t), \quad (5)$$

где $i_{ch}(t)$ — ток канала молнии;

L_{ch} — эквивалентная индуктивность канала молнии;

R_{ch} — эквивалентное активное сопротивление канала молнии;

$u_{eq}(t)$ — эквивалентная ЭДС канала молнии;

$u_m(t)$ — мгновенное напряжение в точке удара на линии.

Данное уравнение позволяет учитывать обратное влияние волновых процессов в линии на форму тока канала.

Эквивалентная ЭДС канала при серийных ударах задается в виде суммы временно сдвинутых функций:

$$u_{eq}(t) = \sum_{r=1}^{N_s} u_{eq,r}(t-t_r), \quad (6)$$

где $u_{eq,r}(t)$ — эквивалентная ЭДС, соответствующая r -му удару.

Такое задание обеспечивает корректную временную суперпозицию отдельных ударов в рамках одной серии.

Ключевым фактором, отличающим серийные грозовые воздействия от одиночного удара, является накопление энергии в ограничителях перенапряжений [12]. Для количественного описания этого процесса для каждого ограничителя вводится энергетическая переменная, динамика которой определяется выражением:

$$\frac{dW_k(t)}{dt} = \max [u_{opn,k}(t)i_{opn,k}(t), 0], \quad (7)$$

где $W_k(t)$ — накопленная энергия k -го ограничения перенапряжения;

$u_{opn,k}(t)$ — мгновенное значение напряжения на ОПН;

$i_{opn,k}(t)$ — мгновенное значение тока ОПН.

Использование оператора $\max(\cdot, 0)$ связано с тем, что в энергетическом критерии учитывается только энергия, рассеиваемая в средстве защиты.

В отличие от одиночного удара при серийных воздействиях накопленная энергия сохраняется между отдельными импульсами, что отражается соотношением:

$$W_k(t_{r+1}^-) = W_k(t_r^+) + \int_{t_r^+}^{t_{r+1}^-} \max [u_{opn,k}(\tau)i_{opn,k}(\tau), 0] d\tau, \quad (8)$$

где $W_k(t_r^+)$ — накопленная энергия k -го ОПН после r -го импульса;

$W_k(t_{r+1}^-)$ — накопленная энергия k -го ОПН непосредственно перед началом следующего, $(r+1)$ -го, импульса;

t_r^+ — момент времени после r -го импульса;

t_{r+1}^- — момент времени непосредственно перед началом следующего импульса;

τ — вспомогательная переменная интегрирования по времени.

Выражение (8) показывает, что между отдельными ударами серии энергетическое состояние ограничителя не обнуляется. Каждый последующий импульс воздействует на ОПН с учетом энергии, накопленной при предыдущих импульсах и переходных процессах между ними.

Рост накопленной энергии приводит к изменению защитных свойств ОПН и в предельном случае к их отказу [13]. Для описания этого эффекта вводится безразмерная переменная целостности $a_k(t)$, эволюция которой определяется соотношением:

$$a_k(t) = \left\{ \begin{array}{ll} 1, & W_k(t) < W_{\text{lim},k} \\ 0, & W_k(t) \geq W_{\text{lim},k} \end{array} \right\}, \quad (9)$$

где $W_{\text{lim},k}$ — предельно допустимая энергия k -го ОПН;

$a_k(t) = 1$ соответствует работоспособному состоянию ОПН;

$a_k(t) = 0$ соответствует отказу ОПН.

До достижения предельной энергии ОПН описывается заданной нелинейной вольт-амперной характеристикой. При выполнении условия ограничитель считается разрушенным, а соответствующая ветвь в расчетной схеме переводится в состояние электрического обрыва. В расчетной модели это задается выражением:

$$i_{\text{ОПН},k}(t) = a_k(t) f_{\text{ВАХ}}(u_{\text{ОПН},k}(t)). \quad (10)$$

Следовательно, при $a_k(t) = 0$ ток через ОПН становится равным нулю, что соответствует обрыву ветви после разрушения ограничителя.

С учетом серийного характера грозового воздействия и энергетических процессов в ограничителях перенапряжений вектор состояния системы принимает вид:

$$x(t) = [i(t) \ u(t) \ i_{ch}(t) \ W(t) \ a(t)]^T. \quad (11)$$

Такой выбор вектора состояния позволяет рассматривать серию ударов молнии как единый нестационарный процесс с сохранением информации о предшествующих воздействиях.

Численные эксперименты и анализ результатов

В данном разделе выполнено численное исследование волновых процессов в ВЛ АБ напряжением 10 кВ при воздействии серии из трех последовательных ударов молнии. Расчеты проводились на основе ранее разработанной и верифицированной математической модели волновых процессов в линиях с распределенными параметрами, реализованной во временной области и дополненной учетом нелинейных характеристик ограничителей перенапряжений и их энергетического ресурса.

В качестве грозового воздействия рассматривалась серия токовых импульсов, заданных аналитической формой Хайдлера. Параметры импульсов выбирались таким образом, чтобы первый удар обладал повышенной энергоемкостью, а последующие удары имели меньшую амплитуду и более короткий хвост, что соответствует характеру реальных серийных грозовых разрядов [14–15]. Амплитуда первого удара составляла 20 кА при параметрах импульса 1,2/50 мкс. Для второго и третьего ударов амплитуда тока принималась равной 18 кА при параметрах импульса 0,8/40 мкс. Интервал между последовательными ударами в серии составлял 40 мкс, что существенно меньше времени полного затухания волновых процессов в линии и тем самым обеспечивает их наложение. Форма тока источника, соответствующая рассматриваемой серии ударов, приведена на рис. 1.

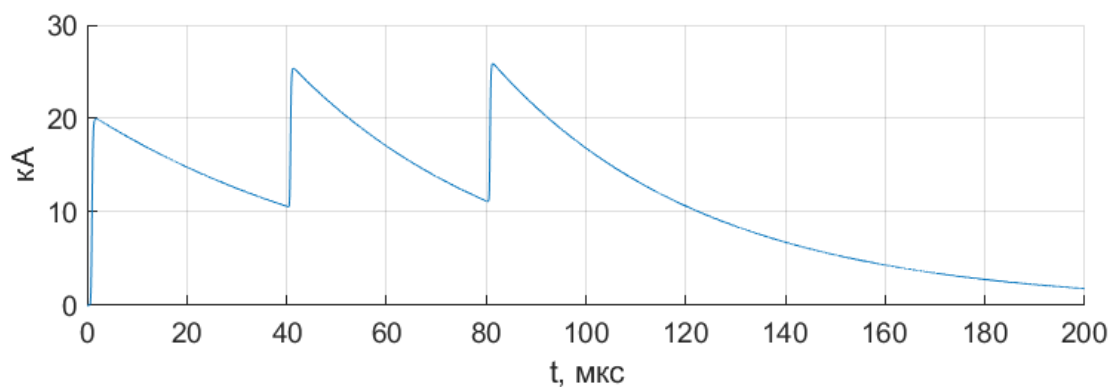


Рис. 1. Форма тока источника, соответствующая серии из трех последовательных ударов молнии

Для оценки влияния основных параметров серии дополнительно анализировалось изменение амплитуды последующих ударов, временного интервала между импульсами, длительности хвоста и числа ударов в серии. Расчеты показали, что максимальные фазные напряжения в конце линии наиболее чувствительны к амплитуде импульсов и междударному интервалу: при уменьшении интервала возрастает степень наложения падающих и отраженных волн, что приводит к увеличению локальных максимумов напряжения. В отличие от этого накопленная энергия ОПН определяется не только амплитудой импульса, но и длительностью хвоста и числом последовательных воздействий, поскольку энергия является интегральной характеристикой процесса.

На рис. 1 отчетливо видна временная структура рассматриваемой серии грозовых воздействий. Каждый импульс характеризуется быстрым нарастанием тока и сравнительно длительным затухающим хвостом, что соответствует физике возвратных ударов молнии. Интервалы между ударами выбраны существенно меньшими времени полного затухания тока, вследствие чего последующие импульсы накладываются на остаточные процессы от предыдущих воздействий. Такая форма токового воздействия создает неблагоприятные условия для работы ограничителей перенапряжений и позволяет выявить накопительные энергетические эффекты при серийных ударах.

Следует отметить, что выбранный интервал между импульсами используется как расчетный неблагоприятный случай. Его уменьшение усиливает наложение волновых процессов, тогда как увеличение интервала приводит к более независимому протеканию переходных процессов от каждого удара. Поэтому временной интервал между импульсами является одним из ключевых параметров, влияющих на форму напряжений в конце линии.

На рис. 2 представлены временные зависимости фазных напряжений в конце линии. Анализ графиков показывает, что каждый удар молнии сопровождается формированием перенапряженной волны с крутым фронтом и последующим

затухающим хвостом, обусловленным отражениями от неоднородностей линии и поглощающим действием нагрузки. При этом второй и третий удары накладываются на незатухшие остаточные колебания от предыдущих воздействий, что приводит к увеличению общего уровня напряжений и усложнению формы временных зависимостей. Наблюдаемая разница амплитуд фазных напряжений связана с асимметрией электромагнитной связи фазных проводников и локализацией точки удара. Наибольшие значения перенапряжений реализуются в фазе А, что является физически ожидаемым результатом при заданной постановке задачи.

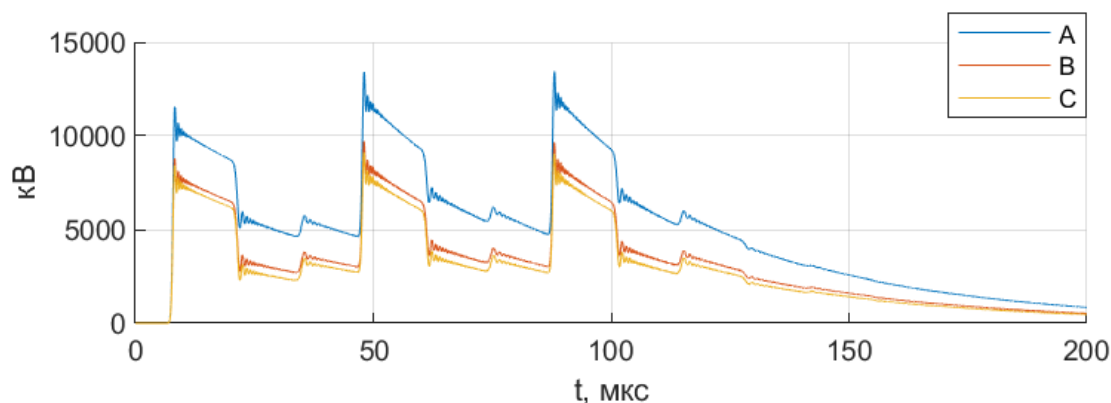


Рис. 2. Временные зависимости фазных напряжений в конце ВЛ АБ 10 кВ при воздействии серии из трех ударов молнии

Таким образом, влияние параметров серии на максимальные перенапряжения проявляется преимущественно через амплитуду импульсов и временной интервал между ними. Увеличение амплитуды приводит к росту падающей волны перенапряжения, а уменьшение интервала между ударами повышает вероятность прихода последующего импульса на фоне незатухших отраженных волн. Поэтому при оценке максимальных напряжений определяющими параметрами являются $I_{p,r}$ и Δt_r .

Особый интерес представляет анализ энергетической нагрузки ограничителей перенапряжений при серийных грозовых воздействиях. На рис. 3 показаны зависимости энергии, рассеиваемой в ОПН, от времени для каждой фазы. Характер изменения энергии имеет выражено ступенчатый вид: каждому удару молнии соответствует резкое приращение энергии, после чего наблюдается участок относительно медленного роста, связанный с затуханием токов через ограничитель. При этом энергия не возвращается к исходному уровню между ударами, что свидетельствует об отсутствии энергетической разгрузки ОПН в интервалах между воздействиями.

Полученные результаты наглядно показывают, что уже при трех последовательных ударах суммарная энергия, рассеиваемая в ограничителях перенапряжений, достигает нормативных значений порядка 3–4 кДж на фазу, соответствующих предельной допустимой энергетической нагрузке для ограничителей данного

класса. Несмотря на то что основной вклад в энергию вносит первый, наиболее мощный удар, последующие удары формируют существенное дополнительное приращение энергии, что подчеркивает принципиальную опасность серийных грозовых воздействий даже при умеренных амплитудах тока. Таким образом, результаты численных экспериментов показывают, что при серийных ударах молнии определяющим фактором работоспособности ограничителей перенапряжений становится не только уровень мгновенных перенапряжений, но и накопление энергии во времени, приводящее к возможному разрушению ОПН в процессе серии и резкому ухудшению условий защиты объекта.

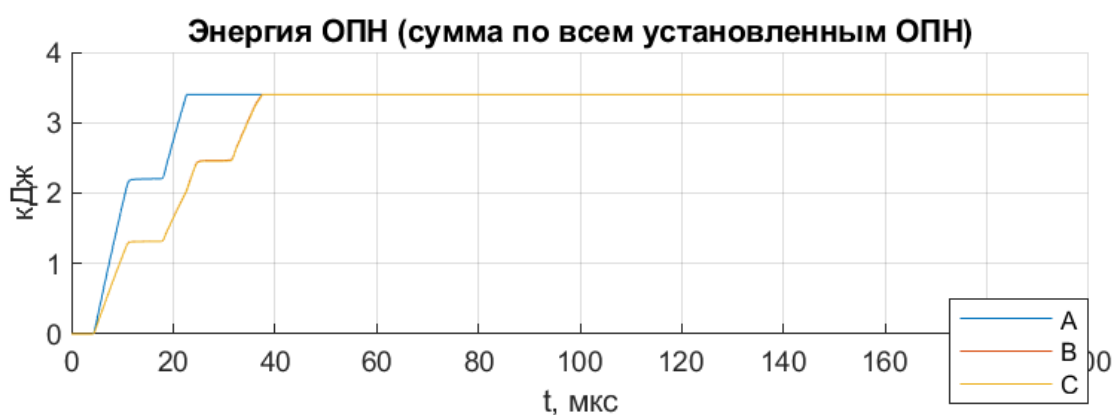


Рис. 3. Изменение энергии, рассеиваемой в ОПН, по фазам при серийных ударах молнии

Анализ влияния параметров серии показывает, что энергетическая нагрузка ОПН зависит от параметров импульса иначе, чем максимальное напряжение. Если максимум напряжения в большей степени определяется амплитудой и моментом прихода очередного импульса, то энергия ОПН определяется интегралом мощности во времени. Поэтому существенное влияние на нее оказывают длительность хвоста импульса, число ударов в серии и отсутствие обнуления энергетического состояния между последовательными воздействиями. Это объясняет, почему последующие удары даже при меньшей амплитуде способны заметно увеличить суммарную энергию, рассеиваемую в ОПН.

Заключение

По результатам исследования показано, что при серийных ударах молнии уровни перенапряжений и характер волновых процессов определяются не только параметрами отдельных импульсов, но и остаточными процессами от предыдущих ударов. В ограничителях перенапряжений реализуется ступенчатое накопление энергии, при котором уже при трех последовательных ударах достигаются нормативные значения порядка 3–4 кДж на фазу, соответствующие предельно допустимой энергетической нагрузке для ограничителей данного класса.

Установлено, что при серийных грозových воздействиях определяющим фактором работоспособности молниезащиты становится энергетическая стойкость ограничителей перенапряжений, а не только их способность ограничивать мгновенные перенапряжения. Разрушение ОПН в процессе серии приводит к резкому ухудшению условий защиты линии автоблокировки и подключенных устройств железнодорожной автоматики.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием математических моделей комплексных средств молниезащиты, формирующих защищенный подход к объекту, включая не только ОПН, но и искровые промежутки, разрядники, комбинированные устройства. Представляет интерес разработка унифицированных моделей таких средств с учетом их нелинейных и энергетических характеристик при серийных грозových воздействиях, а также анализ их совместной работы в составе защищенных подходов устройств ЖАТ.

Список источников

1. Соловьев А. Д., Манаков А. Д. Анализ воздействия атмосферных перенапряжений на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 4. С. 287–302. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-287-302. EDN MYPJAE
2. Соловьев А. Д., Манаков А. Д. Волновые процессы при воздействии молнии в высоковольтной линии автоблокировки 10 кВ // Автоматика на транспорте. 2026. Т. 12, № 1. С. 56–72. DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-01-56-72
3. Rakov V.A., Uman M.A., Thottappillil R. Review of Lightning Properties from Electric Field and TV Observations // Journal of Geophysical Research. 1994. Vol. 99, no. D5. Pp. 10745–10750. DOI: 10.1029/93JD01205
4. Bazelyan E. M., Raizer Y. P. Lightning Physics and Lightning Protection. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2000.
5. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines / C.A. Nucci [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1993. Vol. 35, no. 1. Pp. 75–86.
6. Rachidi F. A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models with Special Emphasis to Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2012. Vol. 54, no. 4. Pp. 898–911. DOI: 10.1109/TEMC.2011.2181519
7. Borghetti A., Nucci C.A. Paolone, M. An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Vol. 22, no. 1. Pp. 684–692. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.881463
8. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, 2003. DOI: 10.1017/CBO9781107340886
9. Heidler F. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung // Proceedings of the 18th International Conference on Lightning Protection (ICLP). Munich, 1985. Pp. 63–66.

10. Furgal J. Influence of Lightning Current Model on Simulations of Overvoltages in High Voltage Overhead Transmission Systems // *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 2. Art. 296. DOI: 10.3390/en13020296
11. Mitigation of Lightning-Induced Overvoltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation / M. Paolone [et al.] // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19, no. 1. Pp. 423–431. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.8201
12. The Impact of Multiple Lightning Strokes on the Energy Absorbed by MOV Surge Arresters in Wind Farms during Direct Lightning Strikes / N. Malcolm [et al.] // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 83. Pp. 1305–1315. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.046
13. Zanetta L. C. Jr. Evaluation of Line Surge Arrester Failure Rate for Multipulse Lightning Stresses // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. Vol. 18, no. 3. Pp. 796–801. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.813862
14. Features of the First and the Subsequent Return Strokes in Positive Ground Flashes Based on Electric Field Measurements / D. Johari [et al.] // *Electric Power Systems Research*, 2017. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.04.031
15. Lightning Current Distribution of the First and Subsequent Strokes Based on the Lightning Location System: Survey in Yunnan Power Grid / Y. Ma [et al.] // *Atmosphere*. 2025. DOI: 10.3390/atmos16010015

Дата поступления: 01.04.2026

Решение о публикации: 18.05.2026

Контактная информация:

СОЛОВЬЁВ Александр Дмитриевич — аспирант; shura.solovyov.01@mail.ru

Wave Processes in a 10 kV High-Voltage Railway Signalling Line Subjected to Serial Lightning Strikes

A. D. Solov'yov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Solov'yov A. D. Wave Processes in a 10 kV High-Voltage Railway Signalling Line Subjected to Serial Lightning Strikes // Bulletin of Scientific Research Results*, 2026, iss. 2, pp. 105–117. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-105-117 (In Russian)

Abstract

Objective: the objective of this study is to investigate wave processes in a 10 kV high-voltage automatic block line under multiple lightning strokes, taking into account energy accumulation and degradation of surge arresters, as well as to assess the influence of these factors on the effectiveness of lightning protection. **Methods:**

the study employs mathematical and numerical modeling in the time domain based on the state-space method. Lightning currents are represented using the analytical Heidler function, combined with a dynamic model of the lightning channel and an energy-dependent model of surge arresters. **Results:** it is shown that under multiple lightning strokes, wave processes in the line overlap in time, leading to increased overvoltage levels. It is established that the energy dissipated in surge arresters accumulates from stroke to stroke and reaches critical values after only a few events. It is demonstrated that the performance of surge arresters is determined not only by instantaneous voltage and current values, but also by the cumulative energy load, which may lead to degradation and eventual failure. **Practical significance:** the practical significance of the study lies in the applicability of the developed model for analyzing multiple lightning events and evaluating the energy loading of surge arresters in the design of lightning protection systems for high-voltage automatic block lines. The results substantiate the necessity of accounting for cumulative effects and transitioning to energy-coordinated protection schemes, including the implementation of protected approaches for railway automation and remote control systems.

Keywords: lightning, serial lightning strikes, wave processes, railway automation and remote control, energy withstand capability

References

1. Solov'yov A. D., Manakov A. D. Analiz vozdeystviya atmosferykh perenapryazhenij na ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [Analysis of the Impact of Atmospheric Overvoltages on Railway Signaling and Interlocking Systems], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2025, vol. 11, no. 4, pp. 287–302. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-287-302, EDN: MYPJAE (In Russian)
2. Solov'yov A. D., Manakov A. D. Volnovye protsessy pri vozdeystvii molnii v vysokovol'tnoj linii avtoblokirovki 10 kv [Wave Processes Under Lightning Impact in a 10 kv High-Voltage Automatic Block Line], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2026, vol. 12, no. 1, pp. 56–72. DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-01-56-72 (In Russian)
3. Rakov V. A., Uman M. A., Thottappillil R. Review of Lightning Properties from Electric Field and TV Observations, *Journal of Geophysical Research*, 1994, vol. 99, no. D5, pp. 10745–10750. DOI: 10.1029/93JD01205
4. Bazelyan E. M., Raizer Y. P. Lightning Physics and Lightning Protection. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2000.
5. Nucci C. A., et al. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, vol. 35, no. 1, pp. 75–86.
6. Rachidi F. A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models with Special Emphasis to Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, vol. 54, no. 4, pp. 898–911. DOI: 10.1109/TEMPC.2011.2181519
7. Borghetti A., Nucci C. A., Paolone M. An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 684–692. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.881463
8. Rakov V. A., Uman M. A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, 2003. DOI: 10.1017/CBO9781107340886

9. Heidler F. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung. *Proceedings of the 18th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Munich, 1985, pp. 63–66.
10. Furgał J. Influence of Lightning Current Model on Simulations of Overvoltages in High Voltage Overhead Transmission Systems, *Energies*, 2020, vol. 13, no. 2, article 296. DOI: 10.3390/en13020296
11. Paolone M., et al. Mitigation of Lightning-Induced Overvoltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 423–431. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.8201
12. Malcolm N., et al. The Impact of Multiple Lightning Strokes on the Energy Absorbed by MOV Surge Arresters in Wind Farms During Direct Lightning Strikes, *Renewable Energy*, 2015, vol. 83, pp. 1305–1315. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.046
13. Zanetta L.C. Jr. Evaluation of Line Surge Arrester Failure Rate for Multipulse Lightning Stresses, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, vol. 18, no. 3, pp. 796–801. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.813862
14. Johari D., et al. Features of the First and the Subsequent Return Strokes in Positive Ground Flashes Based on Electric Field Measurements, *Electric Power Systems Research*, 2017. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.04.031
15. Ma Y., et al. Lightning Current Distribution of the First and Subsequent Strokes Based on the Lightning Location System: Survey in Yunnan Power Grid, *Atmosphere*, 2025. DOI: 10.3390/atmos16010015

Received: April 01, 2026

Accepted: May 18, 2026

Author's information:

Alexandr D. SOLOV'YOV— Postgraduate Student; shura.solovyov.01@mail.ru

УДК 629.4.027.3

Оптимизация параметров рессорного подвешивания и оценка показателей динамических качеств моторного вагона высокоскоростного электропоезда

А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская

Российский университет транспорта (МИИТ), Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Савоськин А. Н., Лавлинская Н. С. Оптимизация параметров рессорного подвешивания и оценка показателей динамических качеств моторного вагона высокоскоростного электропоезда // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 118–132. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-118-132

Аннотация

Цель: реализация федерального проекта по развитию высокоскоростных железнодорожных магистралей требует создания экипажей, отвечающих высоким требованиям к показателям динамических качеств. В ранее выполненных работах были получены параметры рессорного подвешивания моторного вагона высокоскоростного электропоезда на четырех одноосных тележках по результатам исследования его боковых колебаний. Целью данной работы является оптимизация параметров рессорного подвешивания для пространственной модели экипажа, учитывающей нестационарные случайные процессы вертикальных и горизонтальных колебаний кузова и тележек, тяговых передач, а также выполняющей количественную оценку показателей динамических качеств вагона. **Методы:** оптимизация параметров рессорного подвешивания проводилась методами свертки и Нелдера — Мида. В качестве критериев оптимизации были приняты такие показатели динамических качеств, как коэффициенты динамики и суммарные ускорения кузова в шкворневых точках. Обработка результатов моделирования выполнялась вероятностными методами. **Результаты:** были получены оптимальные значения параметров рессорного подвешивания, которые обеспечивают движение экипажа со скоростями до 125 м/с (450 км/ч). Рассмотрены особенности определения коэффициента динамики третьей ступени рессорного подвешивания и плавности хода. Приведены графики двумерных спектральных плотностей деформаций и сил в третьей ступени рессорного подвешивания, а также поперечных ускорений кузова. Приведен двумерный график модуля динамической жесткости третьей ступени рессорного подвешивания. Приведены количественная оценка показателей динамических качеств оптимизированной системы и графические зависимости этих показателей от скорости движения экипажа. Установлено, что зависимости показателей динамических качеств от скорости движения перспективной тележки после достижения максимума значений начинают снижаться в отличие от монотонно возрастающих зависимостей, свойственных типовым конструкциям тележек. **Практическая значимость:** результаты работы имеют значение для развития высокоскоростного железнодорожного движения и могут быть использованы при разработке конструкторской документации на тележку вагона высокоскоростного электропоезда.

Ключевые слова: высокоскоростной электропоезд, тележка, рессорное подвешивание, оптимизация параметров, нестационарные случайные процессы, показатели динамических качеств

Введение

В нашей стране в настоящее время активно идет реализация федерального проекта «Развитие высокоскоростных железнодорожных магистралей», утвержденного Президентом Российской Федерации. Первым этапом развития является строительство высокоскоростной магистрали Москва — Санкт-Петербург, запуск

в эксплуатацию которой планируется на 2028 год. В долгосрочной перспективе также планируется построить высокоскоростные магистрали на южном направлении (от Москвы до Адлера через Рязань), восточном (от Москвы до Екатеринбурга через Нижний Новгород и Казань) и западном (от Москвы до Минска).

В связи с этим возникает актуальная задача по оснащению парка пассажирского подвижного состава новыми высокоскоростными поездами, которые будут обеспечивать соответствие повышенным требованиям. Таким требованиям отвечает перспективная тележка, разработанная на кафедре «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (РУТ-МИИТ).

Постановка задачи

Объектом данного исследования является моторный вагон высокоскоростного электропоезда на четырех одноосных, попарно сочлененных тележках (рис. 1). Эти тележки оснащены трехступенчатым рессорным подвешиванием. Третья ступень обеспечивает непосредственную передачу веса кузова на буксы колесных пар, что при соответствующем подборе параметров рессорного подвешивания переводит рамы тележек в режим работы динамического гасителя колебаний [1], улучшая показатели динамических качеств вагона.

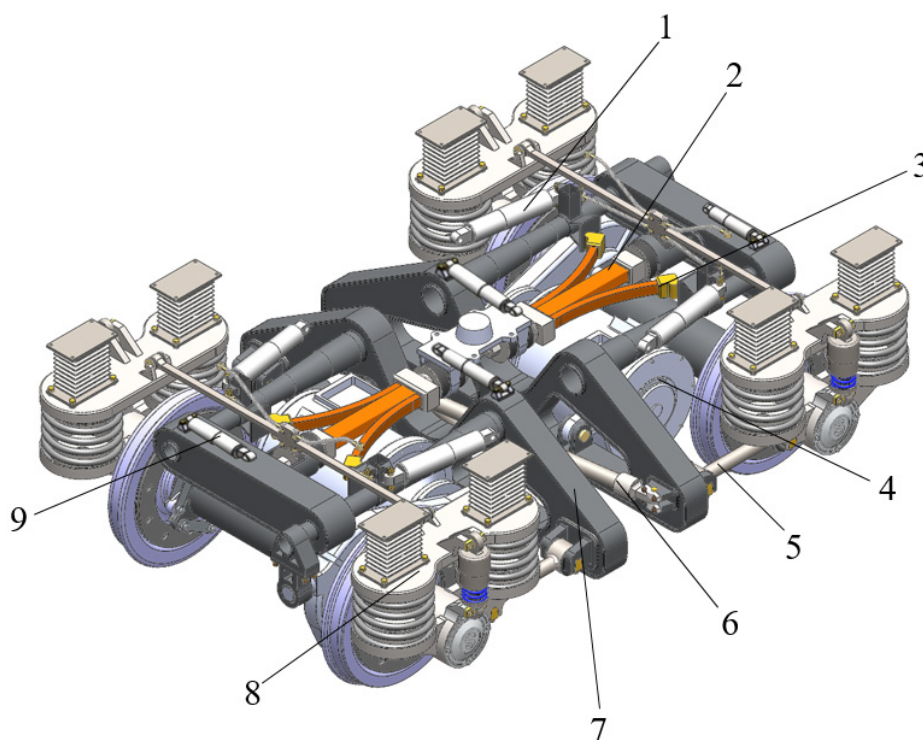


Рис. 1. Моторная тележка высокоскоростного электропоезда с осевой схемой

- $1_0 + 1_0 - 1_0 + 1_0$: 1 — продольный гаситель колебаний; 2 — продольная тяга; 3 — возвращающее устройство; 4 — тяговый электродвигатель; 5 — тяговый поводок; 6 — диагональная тяга; 7 — рама тележки; 8 — рессорный комплект третьей ступени; 9 — поперечный гаситель колебаний

В отличие от предложенной ранее конструкции [2] в первой (буксовой) ступени рессорного подвешивания рассматриваемой в данной работе тележки композитные рессоры заменены тяговыми поводками (5) с резинометаллическими сайлентблоками. Кроме того, во второй ступени продольно расположенные гасители колебаний виляния (1) дополнены гасителями колебаний относительного (9).

Расчетная схема третьей ступени рессорного подвешивания тележки (рис. 2) представляет собой систему, включающую две основные пружины суммарной жесткостью $ж_{3-2}^z$, вспомогательную пружину с жесткостью $ж_{3-1}^z$, гидравлический гаситель с коэффициентом демпфирования β_{3-1}^z и резинометаллический блок, представленный как параллельно установленные пружина с жесткостью $ж_{3-3}^z$ и гидравлический гаситель с коэффициентом демпфирования β_{3-2}^z .

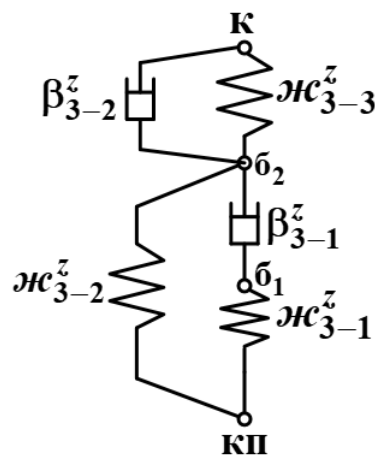


Рис. 2. Комплект третьей ступени рессорного подвешивания: кп — колесная пара; $б_1$ — первая безмассовая точка; $б_2$ — вторая безмассовая точка; к — кузов

Динамическая жесткость комплекта третьей ступени $ж_{д3}^z(j\omega)$ была определена аналогично [3, стр. 33].

Для исследования динамических процессов колебаний такого экипажа была разработана математическая модель его пространственных колебаний, которая имеет 65 степеней свободы и включает в себя вертикальные и горизонтальные колебания твердых тел, входящих в состав экипажа, а также крутильные колебания в тяговой передаче [4]. При разработке модели были учтены нелинейные силовые характеристики, представленные на рис. 3.

В отличие от работы [5], в которой было выполнено решение задачи оптимизации параметров рессорного подвешивания при горизонтальных колебаниях, в данной работе решение этой задачи было выполнено для пространственной модели колебаний.

Для того чтобы задачу многокритериальной оптимизации свести к задаче однокритериальной оптимизации, был использован *метод свертки*. В результате задача оптимизации была сведена к однокритериальной, и для дальнейших

расчетов использовался *метод однокритериальной оптимизации Нелдера — Мида* (метод деформируемого многогранника, или симплекс-метод) [6], рекомендованный в [7].

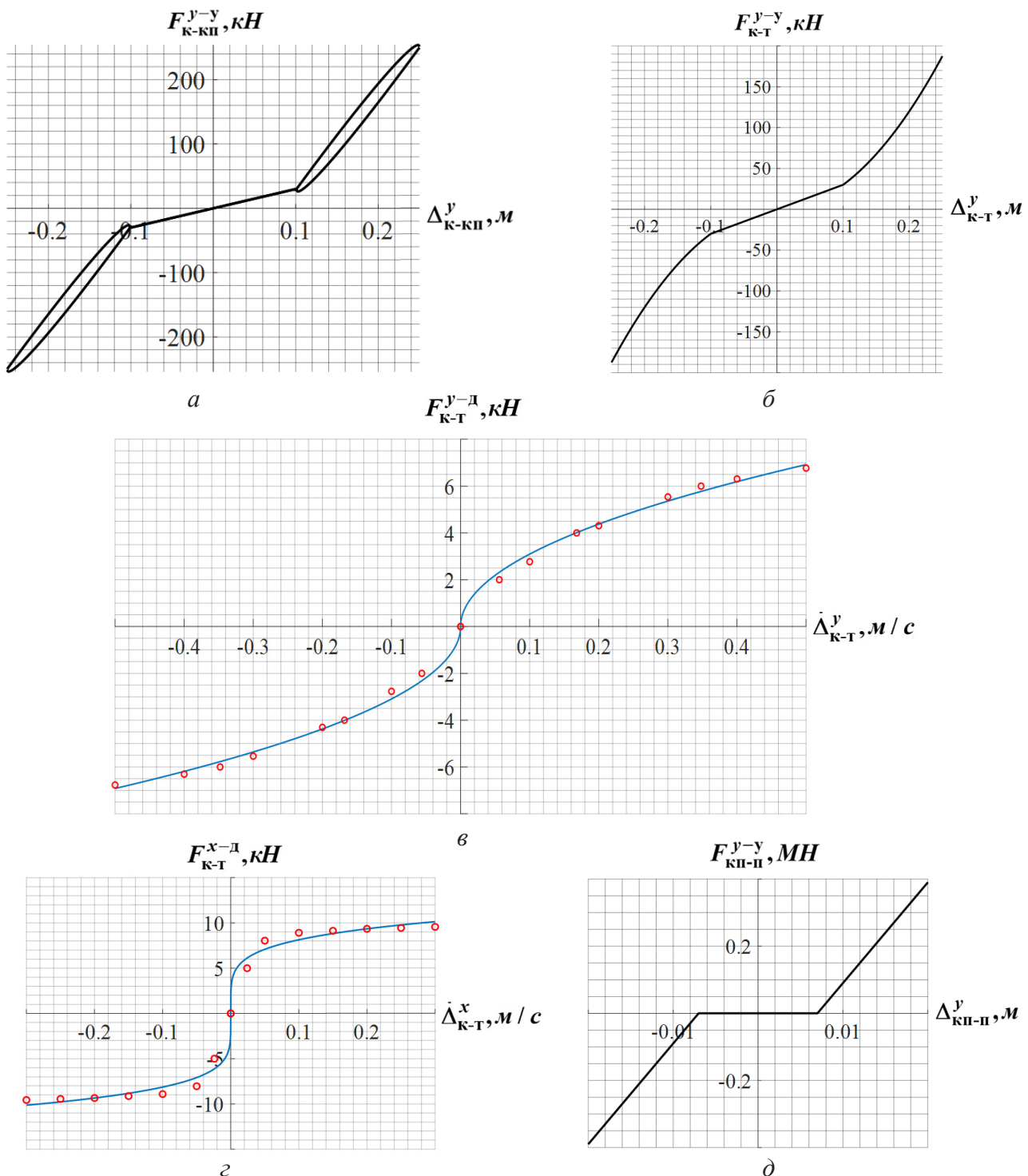


Рис. 3. Нелинейные силовые характеристики: *a* — поперечная характеристика рессорного комплекта третьей ступени; *б* — характеристика возвращающего устройства; *в* — характеристика поперечного гасителя колебаний; *г* — характеристика продольного гасителя колебаний; *д* — упругая характеристика рельсового пути в поперечном направлении

Для оптимизации были выбраны 11 параметров рессорного подвешивания (5 вертикальных и 6 горизонтальных). За критерии оптимизации были приняты максимальные значения коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики всех трех ступеней рессорного подвешивания $k_{д1}^B, k_{д2}^B, k_{д3}^B, k_{д1}^Г, k_{д2}^Г$ и $k_{д3}^Г$, а также максимальные значения суммарных вертикальных и горизонтальных ускорений кузова в шкворневых точках \ddot{z}_k^Σ и \ddot{y}_k^Σ .

Ввиду того что кузов вагона опирается непосредственно на буксы колесных пар, статические нагрузки первой и второй ступеней рессорного подвешивания значительно уменьшились по сравнению с типовыми тележками, имеющими двухступенчатое рессорное подвешивание. С учетом этого за допустимое значение коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики ступеней рессорного подвешивания была принята величина 0,3.

За допустимое значение суммарных вертикальных и горизонтальных ускорений кузова в шкворневых точках была принята величина $0,25g$, где g — ускорение свободного падения.

Показатели динамических качеств оценивались по результатам расчетов вынужденных колебаний модели экипажа. В качестве возмущения колебаний использовались реализации вертикальных и горизонтальных случайных неровностей левого и правого рельса, сгенерированные по упрощенной методике, предложенной авторами в [8]. За исходные данные (начальные точки) для оптимизации были приняты параметры, приведенные в [5]. В результате предварительного анализа модели с исходными значениями параметров были выявлены скорости с наихудшими показателями: 125 м/с — для горизонтальных показателей и 100 м/с — для вертикальных.

Оптимизация проводилась в два этапа. На *первом этапе* оптимизация проводилась отдельно, вначале для вертикальных, затем и для горизонтальных колебаний при скоростях движения с наихудшими показателями. За целевую функцию на этом этапе была принята функция суммарной интенсивности выбросов случайных процессов показателей качества за допустимую область [7, 9]:

$$Ц_I = \sum_{i=1}^n f_c(u_i) \exp \left\{ -\frac{[u_i]}{2S_{u_i}} \right\}, \quad (1)$$

где $[u_i]$ — допустимое значение i -го показателя качества;

S_{u_i} и $f_c(u_i)$ — среднее квадратическое отклонение и эффективная частота случайного процесса i -го показателя качества [7, 10, 11].

На *втором этапе* оптимизация проводилась на полной модели экипажа при всех скоростях движения. За целевую функцию на втором этапе была принята функция суммарных допустимых потерь [7]:

$$Ц_{II} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i - u_i^*}{[u_i] - u_i^*} \right)^2}, \quad (2)$$

где $[u_i]$ и u_i^* — допустимое и минимальное значения i -го показателя, найденные на первом этапе оптимизации;

u_i — значение i -го показателя качества, который определялся как среднее значение абсолютного максимума случайного процесса:

$$\bar{H}_a(u_i) = S_{u_i} \left(\sqrt{2 \ln f_e(u_i) t_p} + \frac{1}{\sqrt{2 \ln f_e(u_i) t_p}} \right). \quad (3)$$

Полученные в результате оптимизации параметры рессорного подвешивания моторного вагона представлены в таблице.

ТАБЛИЦА. Исходные и оптимальные параметры рессорного подвешивания моторного вагона высокоскоростного электропоезда

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение параметра	Исходное значение параметра	Значение параметра после оптимизации	Единица измерения
1	Вертикальная жесткость вспомогательной пружины третьей ступени рессорного подвешивания	$ж_{3-1}^z$	800	1400	кН/м
2	Вертикальная жесткость основных пружин третьей ступени рессорного подвешивания	$ж_{3-2}^z$	550	280	кН/м
3	Коэффициент демпфирования вертикального гасителя колебаний третьей ступени рессорного подвешивания	β_{3-1}^z	20	18	кН/м·с
4	Вертикальная жесткость резинометаллических шарниров буксового поводка	$ж_1^z$	100	45	кН/м
5	Вертикальный коэффициент демпфирования резинометаллических шарниров буксового поводка	β_1^z	3800	500	Н/м·с
6	Поперечная жесткость возвращающего устройства	$ж_2^y$	300	1050	кН/м
7	Поперечная жесткость основных пружин третьей ступени рессорного подвешивания	$ж_{3-2}^y$	300	370	кН/м
8	Коэффициент демпфирования продольного гасителя колебаний	β_2^x	18 300	38 000	$H \cdot \sqrt{\frac{c}{M}}$
9	Коэффициент демпфирования поперечного гасителя колебаний	β_2^y	9885	8500	$H \cdot \sqrt{\frac{c}{M}}$

Окончание таблицы

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение параметра	Исходное значение параметра	Значение параметра после оптимизации	Единица измерения
10	Поперечная жесткость резинометаллических шарниров буксового поводка	$ж_1^y$	140	70	кН/м
11	Поперечный коэффициент демпфирования резинометаллических шарниров буксового поводка	β_1^y	45 000	700	Н/м·с

Определение показателей динамических качеств оптимизированной системы

В процессе оптимизации расчет вероятностных характеристик отдельных координат в первом приближении выполнялся по формулам, применимым для эргодических случайных процессов [10, 11], так как процедура усреднения по множеству реализаций, необходимая для нелинейной системы, требует больших временных затрат. Однако эргодическая теорема неприменима для нелинейных систем. Поэтому окончательная количественная оценка показателей динамических качеств оптимизированной системы выполнялась на основе усреднения по множеству реализаций во всем диапазоне скоростей движения [12]. При этом за величину дисперсии принималось среднее значение абсолютного максимума случайного процесса дисперсии:

$$S_{u_i}^2(t) = \bar{H}_a [S_{u_i}^2(t)] = \overline{S_{u_i}^2(t)} + S[S_{u_i}^2(t)] \left\{ \sqrt{2 \ln f_e [S_{u_i}^2(t)] t_p} + \frac{1}{\sqrt{2 \ln f_e [S_{u_i}^2(t)] t_p}} \right\}. \quad (4)$$

Эффективную частоту нестационарного случайного процесса колебаний предложено определять по двумерной нормированной спектральной плотности:

$$f_e(u_i) = 4 \sqrt{\int_0^\infty \int_0^\infty f_1^2 f_2^2 g_{u_i}(f_1, f_2) df_1 df_2}. \quad (5)$$

Максимальные динамические силы $F_{дmax}$ и максимальные суммарные вертикальные \ddot{z}_k^Σ и поперечные \dot{y}_k^Σ ускорения кузова вычислялись по формуле (3) как среднее значение абсолютного максимума соответствующих случайных процессов, полученных в результате моделирования. Показатели плавности хода вычислялись по спектральным плотностям соответствующих ускорений. Коэффициенты динамики определяются по известной формуле [3, 13].

Спектральная плотность динамической силы третьей ступени определялась как

$$G_{F_{к-кш}^z}(f_1, f_2) = |ж_{д3}^z(jf_1, jf_2)|^2 G_{\Delta_{к-кш}^z}(f_1, f_2). \quad (6)$$

Спектральная плотность деформации третьей ступени рессорного подвешивания $G_{\Delta_{к-кп8}}^z(f_1, f_2)$ (рис. 4, *a*) определяется как произведение дисперсии $S_{\Delta_{к-кп8}}^2$ на нормированную спектральную плотность $g_{\Delta_{к-кп8}}^z(f_1, f_2)$:

$$G_{\Delta_{к-кп8}}^z(f_1, f_2) = S_{\Delta_{к-кп8}}^2 \cdot g_{\Delta_{к-кп8}}^z(f_1, f_2), \quad (7)$$

где $S_{\Delta_{к-кп8}}^2 = \bar{H}_a \left[S_{\Delta_{к-кп8}}^z(t) \right]$ определяется по формуле (4).

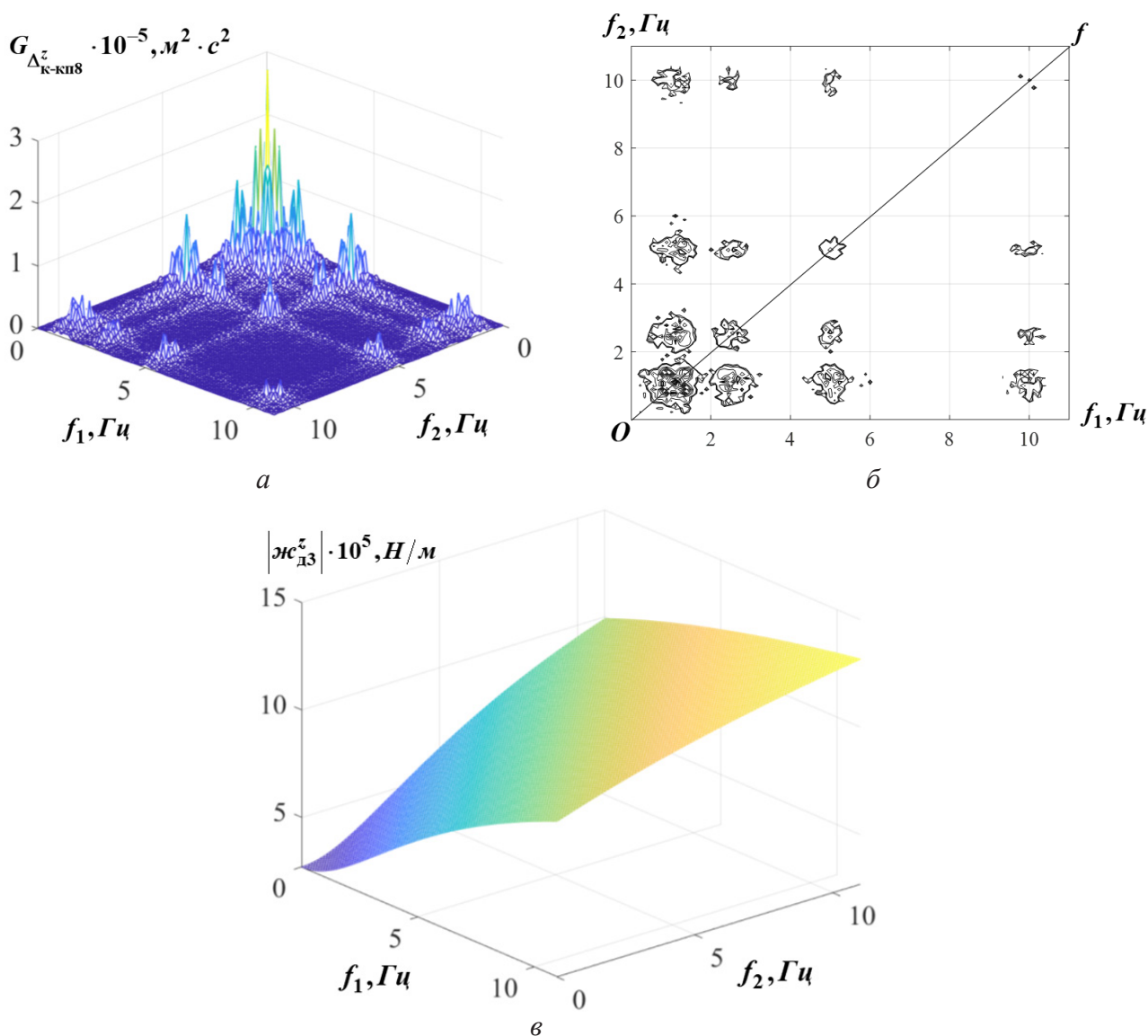


Рис. 4. Спектральная плотность деформации третьей ступени при скорости движения 125 м/с (*a*), ее вид сверху (*б*) и модуль динамической жесткости комплекта третьей ступени (*в*)

Спектральная плотность $G_{\Delta_{к-кп8}}^z(f_1, f_2)$, вычисленная при максимальной скорости движения 125 м/с (рис. 4, *a* и *б*), имеет основные максимумы на частотах $f_{o1} = 0,83$ Гц, $f_{o2} = 1,25$ Гц, $f_{o3} = 2,5$ Гц, $f_{o4} = 5$ Гц и $f_{o5} = 10$ Гц.

Модуль динамической жесткости $|ж_{д3}^z(jf_1, jf_2)|$ (рис. 4, в) имеет вид поверхности, симметричной относительно диагонали. Ординаты графика $|ж_{д3}^z(jf_1, jf_2)|$ возрастают с увеличением частоты.

Спектральная плотность динамической силы третьей ступени восьмой буквы при максимальной скорости движения 125 м/с $G_{F_{к-кп8}^z}(f_1, f_2)$ (рис. 5) была найдена по формуле (12). Она имеет те же максимумы, что и $G_{\Delta_{к-кп8}^z}(f_1, f_2)$, однако высоко-частотные максимумы проявились более явно вследствие увеличения значений динамической жесткости на этих частотах.

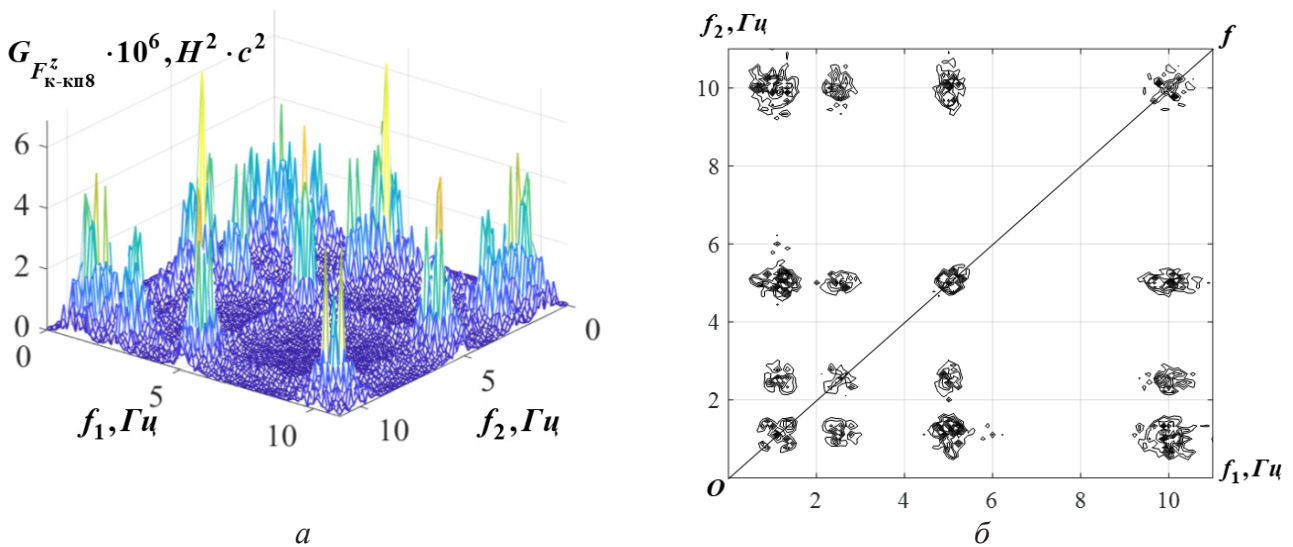


Рис. 5. Спектральная плотность динамических сил третьей ступени (а) и ее вид сверху (б) при скорости движения 125 м/с

Максимальные динамические силы $F_{к-кп8 \max}^z$ третьей ступени рессорного подвешивания вычислялись по их спектральной плотности $G_{F_{к-кп8}^z}(f_1, f_2)$ по известным формулам [7].

Показатели плавности хода в вертикальном W_z и горизонтальном поперечном W_y направлении вычислялись для вагона с оптимальными параметрами рессорного подвешивания по формулам [3, 13]:

$$W_z = 4,346 \times 6,67 \sqrt{\int_{f_n}^{f_B} \int_{f_n}^{f_B} A_{\Phi}^{6,67}(f_1, f_2) \cdot (f_1 + f_2)^{-0,667} \cdot G_{z_{\Sigma}^z}(f_1, f_2) df_1 df_2}; \quad (8)$$

$$W_y = 4,676 \times 6,67 \sqrt{\int_{f_n}^{f_B} \int_{f_n}^{f_B} A_{\Phi}^{6,67}(f_1, f_2) \cdot (f_1 + f_2)^{-0,667} \cdot G_{y_{\Sigma}^z}(f_1, f_2) df_1 df_2}, \quad (9)$$

где $A_{\Phi}(f_1, f_2)$ — двумерная нормированная амплитудно-частотная характеристика корректирующего физиологического фильтра [13].

Спектральные плотности суммарных ускорений $G_{\ddot{y}_k^\Sigma}(f_1, f_2)$ вычислялись аналогично (7).

Для примера на рис. 6 представлена спектральная плотность суммарных горизонтальных ускорений кузова $G_{\ddot{y}_k^\Sigma}(f_1, f_2)$ в шкворневой точке $\ddot{y}_k^\Sigma(t) = \ddot{y}_k(t) - a_1 \ddot{\phi}_k^z(t)$ при скорости движения 80 м/с.

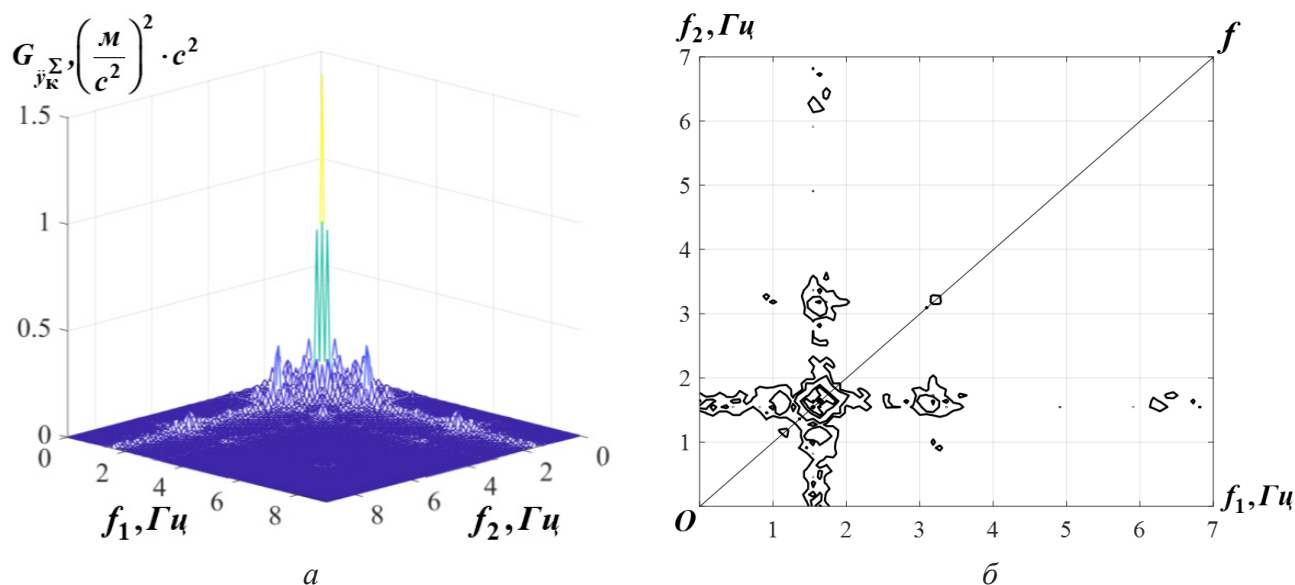


Рис. 6. Спектральная плотность суммарных горизонтальных ускорений кузова в шкворневой точке при скорости движения 80 м/с (а) и ее вид сверху (б)

Спектральная плотность $G_{\ddot{y}_k^\Sigma}(f_1, f_2)$ при скорости движения 80 м/с (рис. 6, б) имеет основные максимумы на частотах $f_{o1} = 1,6$ Гц и $f_{o2} = 3,2$ Гц.

Результаты

Графики зависимостей показателей динамических качеств системы с оптимизированными параметрами от скорости движения представлены на рис. 7. Почти все показатели качества достигают максимумов при определенной скорости, а затем начинают снижаться. Это является особенностью рассматриваемой тележки с трехступенчатым рессорным подвешиванием и обусловлено переходом рамы тележки в режим работы динамического гасителя колебаний.

Так, например, коэффициент вертикальной динамики первой ступени рессорного подвешивания имеет максимум на скорости 252 км/ч, а коэффициент вертикальной динамики третьей ступени — на скорости 396 км/ч. На этих же скоростях большие значения имеют и суммарные вертикальные ускорения кузова. Коэффициенты горизонтальной динамики и суммарные горизонтальные ускорения кузова имеют максимумы на скоростях 288 и 324 км/ч. В отличие от этого значения показателей динамических качеств подвижного состава с типовыми тележками практически монотонно возрастают с ростом скорости движения.

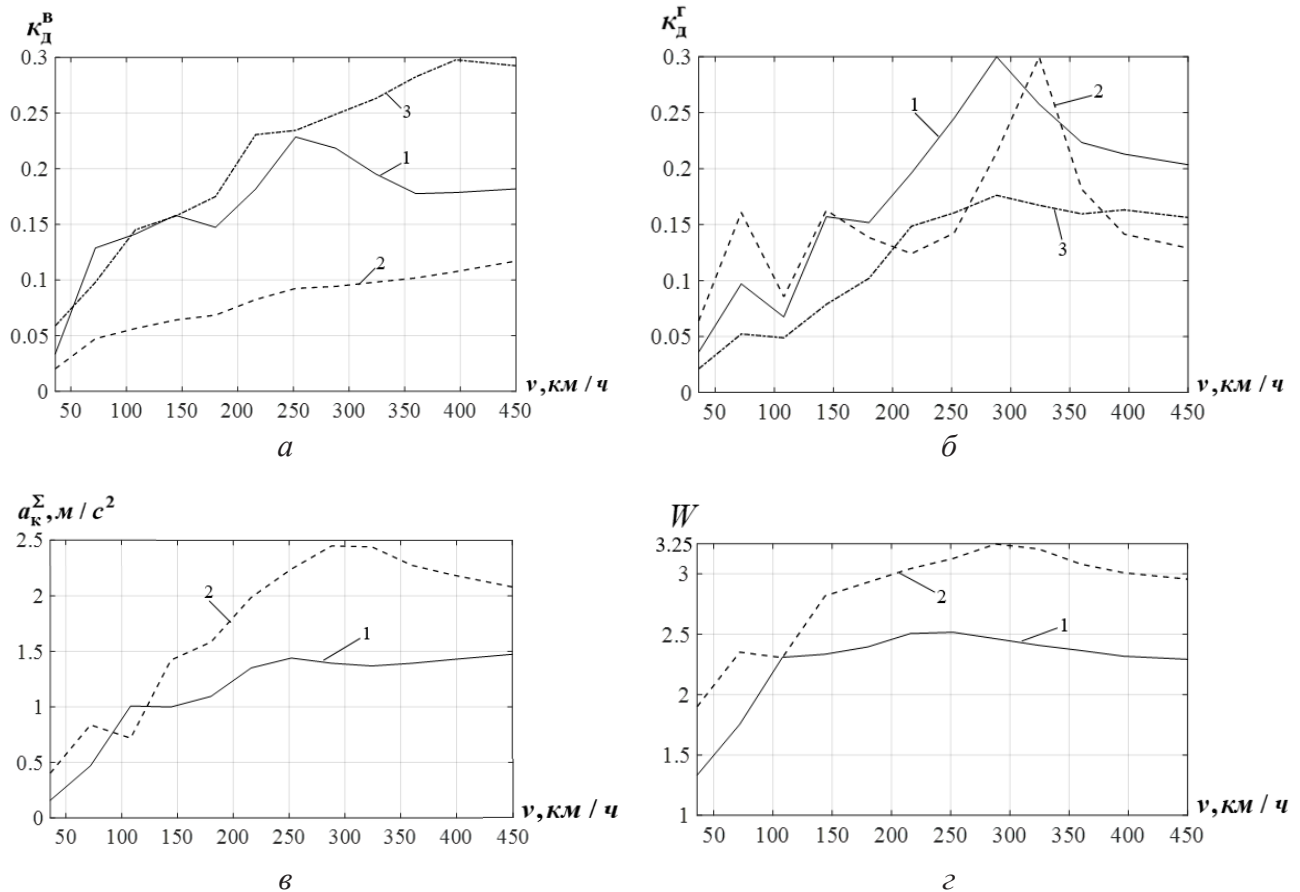


Рис. 7. Показатели динамических качеств оптимизированной системы:

- a* — коэффициент вертикальной динамики;
- б* — коэффициент горизонтальной динамики (кривая 1 — первой ступени, кривая 2 — второй ступени, кривая 3 — третьей ступени);
- в* — суммарные ускорения кузова в шкворневых точках (кривая 1 — вертикальные, кривая 2 — горизонтальные);
- г* — показатели плавности хода (кривая 1 — в вертикальном направлении, кривая 2 — в горизонтальном поперечном направлении)

Так, например, на рис. 8 приведены графики показателей плавности хода, полученные китайскими исследователями при моделировании динамических процессов двух высокоскоростных поездов: типа CRH (рис. 8, *a*) и неуказанного типа (рис. 8, *б*) [14, 15].

Найденные по результатам расчетов значения коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики всех трех ступеней не превышают значения 0,3. Суммарные вертикальные и горизонтальные максимальные ускорения кузова в шкворневых точках не превышают значения 0,25g (рис. 7, *в*). Показатели плавности хода (рис. 7, *г*) не превышают нормативных значений [13].

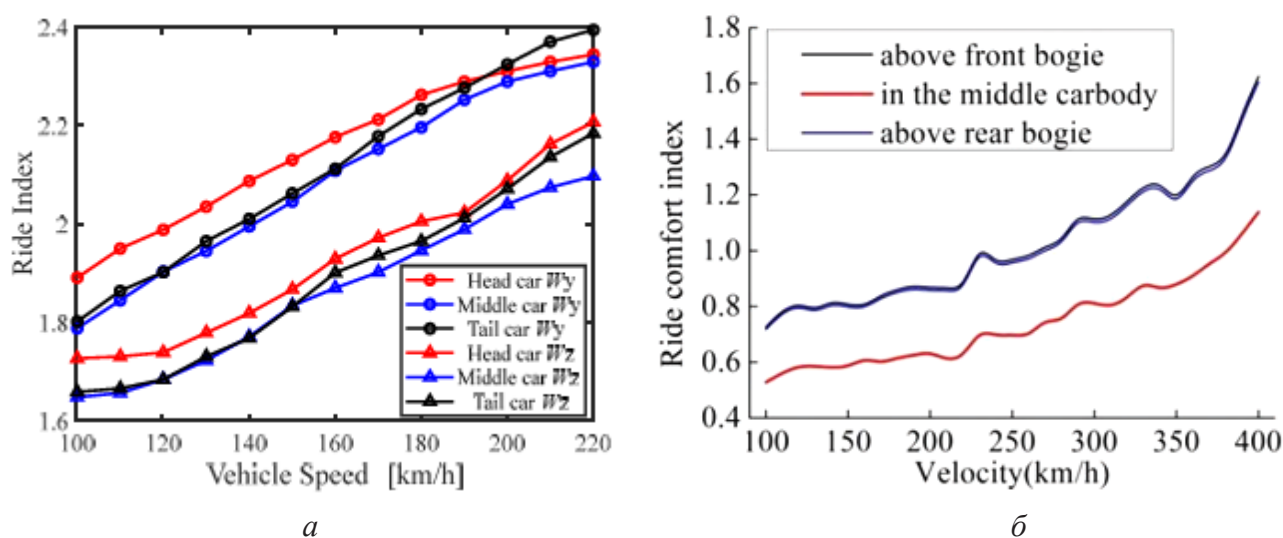


Рис. 8. Показатели плавности хода в зависимости от скорости движения (км/ч):

a — высокоскоростного поезда CRH [14], *б* — высокоскоростного поезда неуказанного типа [15]

Заключение

Полученные в результате оптимизации параметры рессорного подвешивания моторного вагона высокоскоростного электропоезда на четырех одноосных, попарно сочлененных тележках предложенной конструкции обеспечивают соответствие заданным допустимым значениям показателей динамических качеств и могут быть использованы для разработки конструкторской документации.

Список источников

1. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний: учебное пособие. 2-е изд., перераб. М.: Наука, 1980. 272 с.
2. Высокоскоростная тележка для рельсового экипажа: патент на изобретение RU 2613642 С1 Российская Федерация, МПК В61F 5/00. № 2015155956 / Левин Б. А., Савоськин А. Н., Акишин А. А., Ершов А. О.; заявл. 25.12.2015; опубл. 21.03.2017.
3. Механическая часть тягового подвижного состава: учебник / И. В. Бирюков [и др.]; под ред. И. В. Бирюкова. М.: Транспорт, 1992. 440 с.
4. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков [и др.]. М.: Транспорт, 1986. 256 с.
5. Акишин А. А. Горизонтальные колебания и движение в кривых моторного вагона электропоезда на четырех одноосных тележках с пневмоподвешиванием: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 355 с.
6. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 534 с.
7. Савоськин А. Н., Бурчак Г. П., Бондаренко Д. А. Вероятностные методы в задачах динамики, прочности и безотказности рельсовых экипажей. М.: Альянс, 2022. 612 с.

8. Савоськин А. Н., Лавлинская Н. С. Генерирование геометрических неровностей как случайных возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей // Вестник ВНИИЖТ. 2024. № 83 (1). С. 24–39. DOI: 10.21780/2223-9731-2024-83-1-24-39. EDN IRNFWN
9. Болотин В. В. Случайные колебания упругих систем. М.: Наука, 1979. 335 с.
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник для вузов. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.
11. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Радио и связь, 1983. 416 с.
12. Материалы XVIII Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (Санкт-Петербург, 9–12 июля 2025 года). СПб.: ПГУПС, 2026.
13. ГОСТ 33796-2016. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2016. 41 с.
14. Multibody System Dynamics Modelling and Simulation of a High-Speed Train for Its Suspension Optimization / Y. Wu [et al.] // *Vibroengineering Procedia*. 2023. Vol. 50. Pp. 70–76.
15. Study on Suspension Parameters Selection of Suspended Equipment under Carbody for High-speed Train Considering Multi-excitation Condition / M. Xu [et al.] // *World Scientific Research Journal*. 2025. No. 11 (6). Pp. 36–52.

Дата поступления: 01.05.2026

Решение о публикации: 05.06.2026

Контактная информация:

САВОСЬКИН Анатолий Николаевич — доктор техн. наук, профессор; elmechtrans@mail.ru

ЛАВЛИНСКАЯ Наталия Сергеевна — аспирант; lav.nata@mail.ru

Optimization of Spring Suspension Parameters and Evaluation of Dynamic Performance of a High-Speed Electric Train Car

A. N. Savos'kin, N. S. Lavlinskaya

Russian University of Transport (MIIT), bldg. 9, 9 Obraztsova st., Moscow, 127994, Russia

For citation: Savos'kin A. N., Lavlinskaya N. S. Optimization of Spring Suspension Parameters and Evaluation of Dynamic Performance of a High-Speed Electric Train Car // *Bulletin of Scientific Research Results*, 2026, iss. 2, pp. 118–132. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-118-132 (In Russian)

Abstract

Objective: implementation of the federal project for the development of high-speed railways requires the development of carriages that meet high dynamic performance requirements. Previously, spring suspension parameters for a high-speed electric train car on four single-axle bogies were determined based on lateral oscillations. The objective of this study is to optimize the spring suspension parameters for a spatial model of

a carriage taking into account non-stationary random processes of vertical and horizontal oscillations of the car body and bogies, traction drives, and to perform a quantitative assessment of the car's dynamic performance indicators. **Methods:** optimization of the spring suspension parameters was carried out using the convolution and Nelder-Mead methods. Dynamic performance indicators such as dynamic coefficients and total body accelerations at the "pivot" points were adopted as optimization criteria. Probabilistic methods were used to process the modeling results. **Results:** optimal values for the spring suspension parameters were obtained, which ensure carriage movement at speeds of up to 125 m/s (450 km/h). The features of determining the dynamic coefficient of the third stage of the spring suspension and ride comfort are considered. The paper presents graphs of two-dimensional spectral densities of deformations and forces in the third stage of the spring suspension, as well as lateral accelerations of the car body. A two-dimensional graph of the dynamic rigidity modulus of the third stage of the spring suspension is also presented. A quantitative assessment of the dynamic performance indicators of the optimized system and graphical dependences of these indicators on the vehicle speed are presented. It is established that the dependences of the dynamic performance indicators on the vehicle speed of the prospective bogie begin to decrease after reaching a maximum value, in contrast to the monotonically increasing dependences inherent in standard bogie designs. **Practical importance:** the results of this study are important for the development of high-speed railways and can be used in the development of design documentation for the bogie of a high-speed electric train.

Keywords: high-speed electric train, bogie, spring suspension, parameter optimization, non-stationary random processes, dynamic performance indicators

References

1. Panovko Ya.G. Vvedenie v teoriyu mekhanicheskikh kolebanij: uchebnoe posobie [Introduction to the Theory of Mechanical Oscillations: A Textbook], 2nd edition, revised, Moscow, Nauka, 1980, 272 p. (In Russian)
2. Patent no. RU 2613642 C1. Russian Federation, МИК B61F 5/00. Vysokoskorostnaya teleshka dlya rel'sovogo ekipazha [High-Speed Bogie for Rail Vehicles], no. 2015155956, B. A. Lyovin, A. N. Savos'kin, A. A. Akishin, A. O. Ershov: appl. December 25, 2015; publ. March 31, 2017. (In Russian)
3. Biryukov I.V., et al. Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava: uchebnik [Mechanical Part of Traction Rolling Stock: A Textbook], Moscow, Transport, 1992, 440 p. (In Russian)
4. Biryukov I.V., et al. Tyagovye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Traction Drives for Electric Rolling Stock of Railways], Moscow, Transport, 1986, 256 p. (In Russian)
5. Akishin A.A. Gorizontaľnye kolebaniya i dvizhenie v krivykh motornogo vagona elektropoezda na chetyrekh odnoosnykh teleshkakh s pnevmopodveshivaniem [Horizontal Oscillations and Movement in Curves of a Motor Car of an Electric Train on Four Single-Axle Bogies with Pneumatic Suspension]: dis. ... PhD in Engineering, Moscow, 2015, 355 p. (In Russian)
6. Khimmel'blau D. Prikladnoe nelinejnoe programmirovaniye [Applied Non-Linear Programming], Moscow, Mir, 1975, 534 p. (In Russian)
7. Savos'kin A. N., Burchak G.P., Bondarenko D.A. Veroyatnostnye metody v zadachakh dinamiki, prochnosti i bezotkaznosti rel'sovykh ekipazhej [Probabilistic Methods in the Problems of Railway Vehicle Dynamics, Strength and Reliability], Moscow, Alliance Publishing, 2022, 612 p. (In Russian)
8. Savos'kin A.N., Lavlinskaya N.S. Generirovaniye geometricheskikh nerovnostej kak sluchajnykh vozmushchenij, vyzyvayushchikh kolebaniya rel'sovykh ekipazhej [Generating

Geometric Irregularities as Random Disturbances Causing Railway Vehicle Oscillations], *Vestnik Nauchnoissledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [The Russian Railway Science Journal]*, 2024, no. 83 (1), pp. 24–39. URL: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2024-83-1-24-39>. EDN: <https://elibrary.ru/irnfwn> (In Russian)

9. Bolotin V.V. Sluchajnye kolebaniya uprugikh system [Random Vibrations of Elastic Systems], Moscow, Nauka, 1979, 335 p. (In Russian)

10. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostej: ucheb. dlya vuzov [Probability Theory: A Textbook], 6th ed., Moscow, Vysshaya Shkola [Higher School], 1999, 576 p. (In Russian)

11. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. Prikladnye zadachi teorii veroyatnostej [Applied Problems of Probability Theory], Moscow, Radio i svyaz' [Radio and Communication], 1983, 416 p. (In Russian)

12. Materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Podvizhnoj sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty" [Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference "Rolling Stock of the XXI Century: Ideas, Requirements, Projects"], Saint Petersburg, July 9–12, 2025, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2026. (In Russian)

13. GOST 33796-2016. Motorvagonnyj podvizhnoj sostav. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Motor-Car Rolling Stock. Strength and Dynamic Performance Requirements], Moscow, Standartinform, 2016, 41 p. (In Russian)

14. Wu Y., et al. Multibody System Dynamics Modelling and Simulation of a High-Speed Train for Its Suspension Optimization, *Vibroengineering Procedia*, vol. 50, September 2023, pp. 70–76.

15. Xu M., et al. Study on Suspension Parameters Selection of Suspended Equipment under Carbody for High-Speed Train Considering Multi-Excitation Condition, *World Scientific Research Journal*, no. 11 (6), 2025, pp. 36–52.

Received: May 01, 2026

Accepted: June 05, 2026

Author's information:

Anatoly N. SAVOS'KIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; elmechtrans@mail.ru

Natalia S. LAVLINSKAYA — Postgraduate Student; lav.nata@mail.ru

УДК 629.42-192(075)

Интеллектуализация технологий динамического мониторинга подвижного состава железных дорог Китая

Цзеи Шэнь, А. Е. Цаплин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шэнь Цзеи, Цаплин А. Е. Интеллектуализация технологий динамического мониторинга подвижного состава железных дорог Китая // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 133–148. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-133-148

Аннотация

Цель: выявить закономерности и основные направления интеллектуализации технологий динамического мониторинга подвижного состава Китая, определить место системы 5Т в переходе от периодического статического контроля к непрерывной оценке технического состояния в процессе эксплуатации, а также установить роль TFDS в интеграции динамического мониторинга с технологиями машинного зрения и интеллектуального распознавания. **Методы:** выполнен аналитический обзор научно-технической литературы и нормативно-технических материалов, посвященных неразрушающему контролю, динамическому мониторингу и интеллектуальной диагностике железнодорожного подвижного состава. Источники систематизированы по объектам контроля, контролируемым параметрам, физическим принципам диагностики и уровню интеллектуализации обработки данных. На этой основе рассмотрены структура и функциональные особенности комплекса 5Т, взаимосвязь его подсистем, а также особенности внедрения методов машинного зрения, многоканального слияния данных и интеллектуального распознавания, прежде всего в системах типа TFDS. **Результаты:** показано, что на железных дорогах Китая сформировалась многоуровневая система динамического мониторинга подвижного состава, ядром которой является комплекс 5Т. Установлено, что развитие данных технологий характеризуется переходом от автономного контроля отдельных параметров и ручной интерпретации результатов к сетевой интеграции подсистем, многоканальному анализу информации и автоматизированному распознаванию аномалий. Выявлено, что наиболее выраженные признаки интеллектуализации наблюдаются в визуальных диагностических системах, прежде всего в TFDS, где обработка изображений становится основой обнаружения дефектов, оценки состояния узлов и снижения трудоемкости анализа эксплуатационных данных. Показана перспективность сопряжения TFDS с данными других подсистем 5Т для повышения достоверности диагностики, снижения числа ложных срабатываний и перехода от выявления дефектов к прогнозированию рисков. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют уточнить место динамического мониторинга в общей системе контроля технического состояния подвижного состава и определить перспективные направления его интеграции с методами неразрушающего контроля механической части и машинного зрения. Работа может быть использована как теоретическая и обзорно-аналитическая основа для исследований в области эксплуатационной безопасности, диагностики технического состояния и интеллектуального технического обслуживания подвижного состава.

Ключевые слова: подвижной состав железных дорог, динамический мониторинг, система 5Т, машинное зрение, интеллектуальная диагностика, неразрушающий контроль

Введение

Неразрушающий контроль (НК) является важной технической основой диагностики состояния подвижного состава железных дорог, поскольку обеспечивает выявление дефектов ответственных элементов, уточнение характера повреждений

и обоснование ремонтных решений. Вместе с тем традиционные методы НК в основном реализуются в условиях остановочного осмотра, деповского контроля и ремонтных операций, то есть преимущественно в статической среде. Поэтому, несмотря на высокую диагностическую ценность, неразрушающий контроль сам по себе не обеспечивает непрерывное получение информации о состоянии подвижного состава в процессе движения и своевременное выявление развития эксплуатационных аномалий [1, 2].

С развитием железных дорог Китая в условиях роста скоростей движения, осевых нагрузок и интенсивности эксплуатации возрастают требования к онлайн-контролю состояния подвижного состава, непрерывному мониторингу и раннему предупреждению отказов. В этих условиях статический контроль должен дополняться средствами динамического мониторинга. Наиболее системное развитие такой подход получил в Китае в рамках системы мониторинга эксплуатационной безопасности 5T, в базовую конфигурацию которой входят:

- 1) THDS — система интеллектуального контроля температуры букс;
- 2) TPDS — придорожная система динамического мониторинга ходовых качеств подвижного состава;
- 3) TADS — придорожная акустическая система диагностики неисправностей подшипников качения;
- 4) TFDS — система динамического визуального контроля неисправностей грузовых вагонов;
- 5) TCDS — система мониторинга безопасности эксплуатационного состояния пассажирских вагонов.

Нормативные и научно-технические источники рассматривают 5T не как набор разрозненных средств контроля, а как интегрированный контур сбора, передачи и анализа диагностической информации [3–5].

Среди подсистем 5T особое место занимает TFDS, поскольку именно она непосредственно связывает динамический мониторинг с технологиями машинного зрения. В отличие от традиционного визуального осмотра машинное зрение позволяет преобразовывать графическую информацию в формализованные признаки, пригодные для автоматизированного распознавания дефектов, накопления данных и централизованной интерпретации результатов. Современные исследования показывают, что развитие TFDS связано с системным использованием массивов изображений, созданием специализированных платформ обработки данных и внедрением интеллектуальных алгоритмов распознавания, что делает данную подсистему наиболее показательным направлением интеграции динамического мониторинга с методами искусственного интеллекта [6, 7].

В настоящей статье система 5T рассматривается не только как совокупность технических средств контроля, но и как этап эволюции диагностики подвижного состава железных дорог — от статического контроля к динамическому, от

изолированных подсистем к интегрированной архитектуре, от регистрации отдельных отклонений к интеллектуальной интерпретации данных. Такой подход позволяет рассматривать TFDS не изолированно, а в более широком контексте взаимодействия динамического мониторинга, неразрушающего контроля и машинного зрения. В связи с этим целью настоящей статьи является систематизация структуры и направлений интеллектуализации технологий динамического мониторинга железнодорожного подвижного состава Китая с акцентом на систему 5T, роль TFDS и перспективы сопряжения динамического мониторинга с методами неразрушающего контроля и машинного зрения [8].

Роль неразрушающего контроля в диагностике подвижного состава железных дорог

Неразрушающий контроль является одной из базовых технических основ диагностики подвижного состава железных дорог. Его значение определяется возможностью выявления дефектов ответственных деталей и узлов без нарушения их работоспособности, что особенно важно для элементов, непосредственно влияющих на безопасность движения. При эксплуатации железнодорожного транспорта методы неразрушающего контроля применяются прежде всего к осям и колесным центрам колесных пар, деталям автосцепного устройства, рамам тележек, сварным соединениям и ряду элементов буксовых узлов. Наибольшее распространение получили ультразвуковой, магнитопорошковый, вихретоковый и визуально-измерительный методы контроля [9].

С функциональной точки зрения неразрушающий контроль наиболее эффективен в тех случаях, когда требуется детальная оценка состояния конкретного элемента. Его сильные стороны заключаются в высокой степени локализации повреждения, возможности выявления поверхностных, приповерхностных и в ряде случаев внутренних дефектов, а также в использовании результатов контроля как основы для технического решения о допуске детали к эксплуатации, ремонту или выбраковке. Именно поэтому НК сохраняет ключевое значение в деповской и ремонтной практике. Вместе с тем результаты НК используются не только для отбраковки, но и для анализа надежности элементов подвижного состава, что расширяет его роль в системе технической диагностики [10, 11].

В то же время возможности неразрушающего контроля в задачах непрерывного наблюдения за состоянием подвижного состава в процессе движения ограничены. Даже при наличии безразборных технологий НК в большинстве случаев остается связанным с регламентированными осмотрами, ремонтным циклом и стационарными условиями проведения контроля. Следовательно, НК является незаменимым средством детальной дефектоскопии на уровне отдельной детали или узла, но сам по себе не обеспечивает непрерывного получения диагностической информации о поведении объекта в реальных эксплуатационных режимах.

Именно это обстоятельство и обуславливает необходимость дополнения НК технологиями динамического мониторинга, ориентированными на контроль состояния подвижного состава в движении [12].

Динамический мониторинг как функциональное дополнение неразрушающего контроля

В отличие от классического неразрушающего контроля динамический мониторинг ориентирован не на локальное подтверждение дефекта в стационарных условиях, а на получение диагностической информации непосредственно в процессе движения поезда. В методическом отношении он использует сигналы различной физической природы: тепловые, силовые, виброакустические, оптические и бортовые. Однако его сущность определяется не столько набором измеряемых параметров, сколько выполняемыми диагностическими функциями. К их числу относятся раннее выявление аномалий, непрерывный эксплуатационный скрининг и формирование оснований для последующего адресного углубленного контроля. Именно в этом смысле динамический мониторинг становится важным элементом перехода от планово-предупредительной системы обслуживания к системе обслуживания по фактическому состоянию [13, 14].

Диагностическая значимость динамического мониторинга обусловлена тем, что многие эксплуатационные дефекты проявляются прежде всего в условиях движения через сопутствующие эффекты взаимодействия подвижного состава и пути. К ним относятся ударные воздействия в контакте «колесо — рельс», изменение вибрационной и акустической картины, локальный перегрев узлов, а также визуально фиксируемые отклонения состояния элементов. Поэтому ряд неисправностей может быть своевременно выявлен не только по геометрическим признакам после остановки поезда, но и по их динамическим проявлениям в реальном эксплуатационном режиме. Этим объясняется развитие стационарных путевых комплексов, автоматически передающих результаты контроля в систему технического обслуживания и ремонта [15–17].

В такой логике на железных дорогах Китая был сформирован комплекс мониторинга эксплуатационной безопасности 5Т. Его базовые подсистемы — THDS, TPDS, TADS, TFDS и TCDS — объединяют различные каналы восприятия состояния подвижного состава и образуют интегрированный контур динамического контроля, передачи данных и централизованного анализа диагностической информации. Нормативное развитие 5Т показывает, что динамический мониторинг уже рассматривается не как совокупность локальных измерительных средств, а как системная платформа непрерывного наблюдения, раннего предупреждения и информационной поддержки эксплуатационных решений [3, 5].

Следовательно, динамический мониторинг не заменяет неразрушающий контроль, а выполняет по отношению к нему иную диагностическую функцию.

Если НК ориентирован на подтверждение дефекта, его локализацию и детальную оценку состояния конкретной детали, то динамический мониторинг служит инструментом первичного отбора, эксплуатационного скрининга и приоритизации объектов для последующего адресного НК. Именно такая функциональная связка «динамический мониторинг → углубленный контроль» создает основу для перехода к интеллектуальным системам поддержки решений, в которых результаты контроля на ходу поезда используются для целенаправленного назначения дополнительных диагностических процедур.

Система 5Т как основа динамического мониторинга подвижного состава железных дорог Китая

Формирование системы 5Т на железных дорогах Китая отражает переход от локальных и разрозненных средств контроля к интегрированной системе динамического мониторинга эксплуатационного состояния подвижного состава. В базовую конфигурацию 5Т входят THDS, TPDS, TADS, TFDS и TCDS, объединенные в единый контур сбора, передачи и анализа диагностической информации. В этом смысле 5Т следует рассматривать не как простую совокупность отдельных технических средств, а как многоуровневую архитектуру контроля, обеспечивающую непрерывное наблюдение за состоянием подвижного состава в процессе эксплуатации [3, 18]. Структурная схема системы приведена на рис. 1, а сопоставление функций ее подсистем — в таблице.



Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга безопасности эксплуатации подвижного состава 5Т

ТАБЛИЦА. Сравнение подсистем 5Т

Подсистема	Объект контроля	Физический признак	Тип данных	Диагностическая задача	Уровень интеллектуализации
THDS	Буксовые узлы, колеса	Тепловой	Температурные сигналы	Выявление перегрева букс и колес	Базовый
TPDS	Система «экипаж — путь», колесные пары	Динамический	Параметры колесно-рельсового взаимодействия	Оценка ходовых качеств и выявление динамических отклонений	Средний
TADS	Подшипники качения	Акустический	Акустические сигналы	Раннее выявление дефектов подшипников	Средний
TFDS	Узлы и детали грузовых вагонов	Визуальный	Изображения	Выявление неисправностей и распознавание дефектов	Высокий
TCDS	Пассажирский подвижной состав	Комплексный бортовой	Бортовая телеметрия	Непрерывный контроль эксплуатационной безопасности	Средний

Подсистемы 5Т различаются по объектам контроля и используемым физическим признакам. THDS реализует тепловой контроль буксовых узлов, TPDS предназначена для регистрации параметров динамического взаимодействия системы «экипаж — путь», TADS ориентирована на акустическую диагностику неисправностей подшипников качения, TFDS обеспечивает визуальный контроль технического состояния грузовых вагонов, а TCDS выполняет функции мониторинга безопасности пассажирского подвижного состава. Благодаря такой структуре система 5Т формирует многоканальную диагностическую среду, в которой тепловые, динамические, акустические, визуальные и бортовые данные не дублируют друг друга, а описывают состояние подвижного состава с разных сторон [18].

Именно различие физической природы, структуры и степени формализуемости этих данных обуславливает неравномерность интеллектуализации отдельных подсистем 5Т. Анализ литературы показывает, что для THDS, TADS и TCDS в первую очередь подтверждены функции мониторинга, сигнализации и централизованной передачи диагностической информации [18], тогда как TPDS в большей степени развивается в направлении анализа эксплуатационных массивов данных, выявления закономерностей отказов и поддержки принятия решений. Наиболее высокая готовность к внедрению методов машинного зрения и глубокого обучения характерна для визуальных подсистем, поскольку изображения естественным

образом допускают построение стандартизованных датасетов, разметку объектов и обучение моделей распознавания. В этом отношении TFDS занимает особое место внутри 5Т.

Ценность 5Т состоит не только в параллельном наблюдении за разными признаками состояния, но и в возможности их взаимной верификации. Повышение достоверности тревожных сообщений достигается за счет совместного использования данных нескольких подсистем и технической истории объекта [18]. Следовательно, системная организация 5Т создает предпосылки не просто для накопления информации, а для перехода к комплексной интерпретации сигналов, корреляции тревожных признаков и снижению доли ложных срабатываний. Именно эта особенность делает 5Т не только эксплуатационной, но и методологической основой дальнейшего применения алгоритмов искусственного интеллекта [19].

Наиболее показательное направление такого перехода демонстрирует TFDS. Развитие данной подсистемы связано уже не только с получением изображений движущегося вагона, но и с построением стандартизованных массивов данных, созданием специализированных платформ обработки изображений и внедрением интеллектуальных схем распознавания [20]. Поэтому TFDS выступает не просто одной из подсистем 5Т, а ключевым звеном, через которое динамический мониторинг соединяется с машинным зрением и последующими AI-решениями. Такой опыт непосредственно подводит к дальнейшему рассмотрению TFDS как визуально-диагностической подсистемы с наибольшим потенциалом интеллектуального развития и соответствует общей тенденции перехода от периодического контроля к диагностике состояния подвижного состава при его эксплуатации.

TFDS как визуально-диагностическая подсистема динамического мониторинга

Среди подсистем 5Т особое место занимает TFDS, поскольку именно она реализует визуальный канал динамического мониторинга грузовых вагонов. TFDS использует придорожные высокоскоростные средства получения изображений для регистрации нижней части и боковых поверхностей вагона в процессе движения и является важной составной частью системы контроля эксплуатационной безопасности. В отличие от THDS, TPDS и TADS, основанных соответственно на тепловых, динамических и акустических признаках, TFDS работает с оптической информацией и тем самым непосредственно связывает динамический мониторинг с задачами машинного зрения [21].

Такое положение делает TFDS наиболее естественной точкой интеграции динамического мониторинга с методами машинного зрения. В технической литературе России системы технического зрения рассматривались как средство диагностики узлов механической части подвижного состава и регистрации железнодорожных составов, а в современных обзорах по computer vision for railways

подчеркивается, что именно придорожные камеры, автоматизированный анализ изображений и дистанционная визуальная инспекция становятся одним из ключевых направлений развития диагностики железных дорог [22–24]. Вместе с тем для TFDS характерны и специфические ограничения: качество изображений зависит от освещенности, загрязнения оптики, ракурса съемки, вибрационного воздействия и неоднородности фона, поэтому визуальный канал следует рассматривать не как универсальную замену другим средствам мониторинга, а как наиболее развитое их дополнение.

Практическая значимость TFDS определяется масштабом ее применения. По данным последних исследований, система уже развернута более чем на 540 пунктах сети железных дорог Китая, а среднесуточный объем контроля достигает около 950 тыс. грузовых вагонов [21]. При таком объеме ручной просмотр изображений становится не только трудоемким, но и уязвимым к утомлению оператора и неравномерности качества оценки. Именно поэтому развитие TFDS следует связывать не просто с накоплением изображений, а с формированием централизованной визуально-данной инфраструктуры, пригодной для стандартизированной обработки и последующего интеллектуального анализа.

Ключевым условием перехода TFDS к машинному зрению стало построение стандартизированной базы визуальных данных. В исследовании по созданию TFDS-датасета показано, что исходные массивы изображений характеризуются неоднородностью форматов, существенным разбросом качества, дисбалансом классов неисправностей и недостатками разметки. Для устранения этих ограничений предложена последовательность «доступ к данным — очистка — классификация — балансировка — разметка — разделение на выборки». В процедуре классификации и арбитража были задействованы 36 профессиональных динамических осмотрщиков, использованы исторические данные за 10 лет эксплуатации, а итоговая номенклатура охватила 367 типов неисправностей категорий А, В и С. Сформированный набор данных включил 18 350 размеченных изображений и создал основу для перехода от визуального наблюдения к обучаемым алгоритмам распознавания [20].

Алгоритмические исследования подтверждают принципиальную совместимость TFDS с методами машинного зрения. В одной из работ предложена схема распознавания, включающая предварительное улучшение изображений, бинаризацию методом Оцу, многомасштабное извлечение признаков и SE-модуль; авторы сообщают о среднем показателе обнаружения 96,7% [8]. Вместе с тем такие результаты следует трактовать осторожно: метрики отдельных моделей зависят от структуры выборки, протокола валидации, качества разметки и условий съемки, поэтому их не следует отождествлять с универсальной эксплуатационной эффективностью всей системы TFDS. На рис. 2 представлена укрупненная схема процесса интеллектуального распознавания неисправностей в системе TFDS,

включающая оценку качества изображений, выделение узлов и деталей, распознавание неисправностей, анализ особых аномалий и комплексную интерпретацию результатов на уровне вагона.



Рис. 2. Схема процесса интеллектуального распознавания неисправностей в системе TFDS

Таким образом, TFDS следует рассматривать как наиболее развитый, но не исчерпывающий пример интеллектуализации динамического мониторинга в системе 5Т. Ее особое значение определяется тем, что визуальные данные одновременно пригодны и для машинной обработки, и для экспертной проверки результатов, что делает TFDS естественной основой для модели «AI + экспертная верификация». В этом качестве TFDS выступает связующим звеном между системой 5Т, технологиями машинного зрения и последующим этапом внедрения более сложных AI-схем, включая архитектуры типа «центр обучения — периферийный вывод» [8, 20].

Интеграция системы 5Т с технологиями искусственного интеллекта

Интеграция системы 5Т с технологиями искусственного интеллекта отражает переход от регистрации отдельных тревожных признаков к их совместному анализу в едином диагностическом контуре. Нормативное развитие 5Т закрепляет ее как сетевую архитектуру мониторинга, объединяющую тепловой, динамический, акустический, визуальный и бортовой каналы контроля, тогда как в исходных работах по 5Т повышение достоверности тревожных сообщений связывается с использованием данных нескольких подсистем и технической истории объекта [5, 18].

В методическом отношении развитие AI-компонента в системе 5T может быть представлено как последовательность уровней: сигнализация, автоматическое выявление аномалий, классификация дефектов, сопоставление данных различных подсистем и предиктивная диагностика. При этом отдельные подсистемы находятся на разных стадиях такого перехода. Для THDS, TADS и TCDS в литературе прежде всего подтверждены функции мониторинга и оповещения, тогда как TPDS уже развивается в направлении анализа больших массивов эксплуатационных данных, оценки технического состояния вагонов и выявления закономерностей отказов [19]. Визуальные подсистемы в целом обладают более высокой пригодностью к использованию методов машинного зрения, поскольку их данные легче стандартизируются, размечаются и используются для обучения моделей [8, 25].

На уровне всей системы 5T наиболее перспективным представляется объединение разнородных диагностических признаков в единой логике принятия решений. Так, THDS может фиксировать тепловую аномалию буксового узла, TADS — уточнять вероятность повреждения по акустическим признакам, TPDS — отражать изменение динамического поведения экипажа, TFDS — давать визуальное подтверждение внешних признаков, а TCDS и иные бортовые данные — добавлять эксплуатационный контекст. В этом случае задача искусственного интеллекта состоит не только в распознавании отдельных дефектов, но и в ранжировании тревожных сообщений, снижении числа ложных срабатываний и формировании оснований для последующего адресного контроля и ремонта [5, 13, 18, 25].

Наиболее проработанная инженерная модель такого подхода пока представлена в TFDS. В решении на базе больших моделей реализована распределенная схема «центр обучения — периферийный вывод», дополненная экспертными правилами и режимом «AI-контроль + ручная верификация». Тем самым TFDS демонстрирует не просто применение отдельного алгоритма, а практическую организационную модель внедрения искусственного интеллекта в систему динамического мониторинга, ориентированную на повышение скорости обработки данных и устойчивости диагностических решений [8].

Таким образом, текущее состояние интеграции 5T и искусственного интеллекта наиболее корректно описывается моделью «автоматизированное выявление — экспертная верификация — последующее решение по контролю и ремонту». Дальнейшее развитие данной архитектуры должно быть связано с унификацией данных различных подсистем 5T, построением механизмов взаимной верификации тревожных сообщений и переходом к предиктивной оценке риска в рамках состояния-ориентированного обслуживания [19].

Заключение

Проведенный анализ показывает, что развитие диагностики железнодорожного подвижного состава в Китае связано с переходом от преимущественно

статических форм контроля к многоуровневому динамическому мониторингу в эксплуатационных условиях. При этом неразрушающий контроль сохраняет базовое значение как средство подтверждения, локализации и уточнения дефектов на уровне отдельных деталей и узлов, тогда как динамический мониторинг обеспечивает раннее выявление аномалий и непрерывный эксплуатационный скрининг в процессе движения. Следовательно, эти два направления следует рассматривать не как конкурирующие, а как взаимодополняющие компоненты единой системы диагностики.

В данной логике система 5Т выступает не просто совокупностью отдельных подсистем, а технологическим каркасом интеграции теплового, динамического, акустического, визуального и бортового каналов наблюдения. Среди подсистем 5Т наиболее показательной в отношении интеллектуализации является TFDS, поскольку именно визуальные данные оказались наиболее подготовленными к стандартизации, накоплению и алгоритмической обработке. Тем самым TFDS выступает связующим звеном между динамическим мониторингом, машинным зрением и прикладным использованием технологий искусственного интеллекта.

В более широком плане интеллектуализацию 5Т следует связывать не с автономным внедрением отдельных AI-моделей в изолированные подсистемы, а с формированием многоуровневой системы поддержки решений на основе совместного использования данных различных контуров 5Т и результатов неразрушающего контроля. В исследовательском и практическом отношении наиболее перспективными направлениями представляются унификация данных подсистем 5Т, разработка методов межсистемной верификации тревожных сообщений, применение интеллектуальных средств поддержки персонала и переход к предиктивной оценке риска в рамках обслуживания по фактическому состоянию.

Список источников

1. A Review on Condition Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock / P. Kundu [et al.] // Proceedings of the PHM Society European Conference. 2018. Vol. 13. Pp. 1–15.
2. Kostrzewski M., Mel'nik R. Condition Monitoring of Rail Transport Systems: A Bibliometric Performance Analysis and Systematic Literature Review // Sensors. 2021. Vol. 21 (14). P. 4710.
3. Китайская железнодорожная корпорация. Правила технического обслуживания и ремонта оборудования системы мониторинга безопасности эксплуатации подвижного состава (5Т) = 车辆运行安全监控系统设备检修维护管理规则: TG/CL 210–2015. Пекин, 2015. [На кит. яз.]
4. Research and Application of the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring (5t) System / Jiang Hui [et al.] // Journal of Highway and Transportation Research and Development. 2009. No. 1. Pp. 1–6.
5. Государственное железнодорожное управление КНР. Государственное железнодорожное управление КНР опубликовало два отраслевых стандарта, включая «Нормы проектирования

системы мониторинга безопасности эксплуатации железнодорожных вагонов». 04.01.2022. URL: <https://www.nra.gov.cn/> (дата обращения: 20.01.2026).

6. A Survey of the Application of Machine Vision in Rail Transit System Inspection / Wei Xiukun [et al.] // *Control and Decision*. 2021. Vol. 36, no. 2. Pp. 257–282.

7. TFDS Truck Fault Image Application System / Wang Deming [et al.] // *Railway Computer Application*, 2024. Vol. 33 (9). Pp. 59–67.

8. Mu Xin. Intelligent Recognition of TFDS Faults Based on Large Model Technology // *Railway Computer Application*. 2025. Vol. 34 (11). Pp. 8–14.

9. Пудовиков С. А. Безразборная технология ультразвукового контроля осей колесных пар при ремонте подвижного состава // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2005. № 1. С. 108–113.

10. Коростелева Е. Ю., Толмачев И. И. Применение магнитопорошкового и вихретокового методов контроля для деталей и узлов локомотивов и моторвагонного подвижного состава // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2008. Т. 312, № 2S. С. 264–267.

11. Ахмеджанов Р. А., Макарович В. В., Родченко Л. А. О совершенствовании ультразвукового контроля оси колесной пары вагона // *Известия Транссиба*. 2014. № 2 (18). С. 7–18.

12. Воробьев А. А., Карпов В. А. Анализ надежности подвижного состава по результатам неразрушающего контроля // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2015. Т. 3, № 1 (80). С. 65–70.

13. Марюхненко В. С., Пультяков А. В. Особенности контроля технического состояния подвижного состава на ходу поезда // *Автоматика на транспорте*. 2016. Т. 2, № 2. С. 272–287.

14. Давыдов Ю. А., Пляскин А. К., Кушнирук А. С. Контроль фактического технического состояния локомотивов на основе диагностики // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2018. № 3 (59). С. 38–47.

15. Анализ методов измерений силового воздействия подвижного состава на путь и систем технического контроля колес при движении поезда / Ю. П. Бороненко [и др.] // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2020. Т. 17, № 3. С. 324–344.

16. Мониторинг технического состояния грузовых вагонов на ходу поезда / В. В. Попов [и др.] // *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике*. 2021. № 1–2 (92–93). С. 52–56.

17. Баранов Л. А., Бурченков В. В. Технология мониторинга подвижного состава на основе дистанционного акустического зондирования // *Автоматика на транспорте*. 2022. Т. 8, № 1. С. 90–100.

18. Research and Application of the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring (5T) System / Jiang Hui [et al.] // *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. 2009. No S1. Pp. 1–6.

19. Design of the TPDS Big Data Analysis System / Shi Xiaolei [et al.] // *Railway Locomotive & Car*. 2022. Vol. 42, no. 1. Pp. 95–98.

20. Construction Techniques for an Intelligent Recognition Dataset of Railway Freight Car Fault Images / Qi Miaomiao [et al.] // *China Railway*, 2025.

21. Цаплин А. Е. Диагностика узлов механической части подвижного состава с применением комплекса машинного зрения // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2011. № 2. С. 41–49.

22. Казанский Н. Л., Попов С. Б. Распределенная система технического зрения регистрации железнодорожных составов // *Компьютерная оптика*. 2012. Т. 36, № 3. С. 419–428.

23. A Review of Computer Vision for Railways / B. Olivier [et al.] // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025.

24. Machine Vision-Based Method for TFDS Freight Car Fault Image Recognition / Sun Yinong [et al.]. 2025.

25. A Review of Machine Vision Applications in State Detection of Rail Transit Systems / Wei Xiukun [et al.] // *Control and Decision*. 2021. Vol. 36 (2). Pp. 257–282.

Дата поступления: 20.04.2026

Решение о публикации: 26.04.2026

Контактная информация:

ШЭНЬ Цзеи — аспирант; 787612109@qq.com

ЦАПЛИН Алексей Евгеньевич — кандидат техн. наук, доцент; tsaplin.alexey@mail.ru

Intellectualization of Dynamic Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock in China

Jieyi Shen, A. E. Tsaplin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Shen Jieyi, Tsaplin A. E. Intellectualization of Dynamic Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock in China // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 133–148. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-133-148 (In Russian)*

Abstract

Objective: to identify the patterns and main directions in the intellectualization of dynamic monitoring technologies for railway rolling stock in China; to determine the role of the 5T system in the transition from periodic static inspection to continuous condition assessment during operation; and to establish the role of TFDS in integrating dynamic monitoring with machine vision and intelligent recognition technologies.

Methods: an analytical review was carried out of scientific, technical, and regulatory sources devoted to non-destructive testing, dynamic monitoring, and intelligent diagnostics of railway rolling stock. The sources were systematized according to inspection objects, monitored parameters, physical diagnostic principles, and the level of intelligence in data processing. On this basis, the structure and functional features of the 5T system, the

interrelations among its subsystems, and the specific features of implementing machine vision, multi-source data fusion, and intelligent recognition methods, primarily in TFDS-type systems, were examined. **Results:** it is shown that a multi-level dynamic monitoring system for rolling stock has been established on China's railways, with the 5T system serving as its core. It was found that the development of these technologies is characterized by a transition from autonomous monitoring of individual parameters and manual interpretation of results to network-based integration of subsystems, multichannel information analysis, and automated anomaly recognition. It was also revealed that the most pronounced features of intellectualization are observed in visual diagnostic systems, primarily in TFDS, where image processing has become the basis for defect detection, condition assessment of components, and reduction of the labor intensity of operational data analysis. The potential of integrating TFDS with data from other 5T subsystems to improve diagnostic reliability, reduce false alarms, and move from defect detection to risk prediction is also demonstrated. **Practical significance:** the results obtained make it possible to clarify the role of dynamic monitoring within the overall system of technical condition assessment of railway rolling stock and to identify promising directions for its integration with non-destructive testing methods for mechanical components and machine vision technologies. The study may be used as a theoretical and review-analytical basis for further research in the fields of operational safety, technical condition diagnostics, and intelligent maintenance of rolling stock.

Keywords: railway rolling stock, dynamic monitoring, 5T system, machine vision, intelligent diagnostics, non-destructive testing

References

1. Kundu P., et al. A Review on Condition Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock, *Proceedings of the PHM Society European Conference*, 2018, vol. 13, pp. 1–15.
2. Kostrzewski M., Melnik R. Condition Monitoring of Rail Transport Systems: A Bibliometric Performance Analysis and Systematic Literature Review, *Sensors*, 2021, vol. 21 (14), p. 4710.
3. China Railway Corporation. Rules for Inspection, Maintenance and Management of Equipment for the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring System (5T), 车辆运行安全监控系统设备检修维护管理规则: TG/CL 210–2015. Beijing, 2015. (In Chinese).
4. Jiang Hui, et al. Research and Application of the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring (5t) System, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, no. S1, pp. 1–6.
5. Gosudarstvennoe zheleznodorozhnoe upravlenie KNR. Gosudarstvennoe zheleznodorozhnoe upravlenie KNR opublikovalo dva otraslevykh standarta, vklyuchaya "Normy proektirovaniya sistemy monitoringa bezopasnosti ekspluatatsii zheleznodorozhnykh vagonov" [National Railway Administration. The National Railway Administration Issued Two Industry Standards, Including the Design Specification for the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring System], January 04, 2022. URL: <https://www.nra.gov.cn/> (accessed: January 20, 2026).
6. Xiukun Wei, et al. A Survey of the Application of Machine Vision in Rail Transit System Inspection, *Control and Decision*, 2021, vol. 36, no. 2, pp. 257–282.
7. Wang Deming, et al. TFDS Truck Fault Image Application System, *Railway Computer Application*, 2024, vol. 33 (9), pp. 59–67.
8. Mu Xin. Intelligent Recognition of TFDS Faults Based on Large Model Technology, *Railway Computer Application*, 2025, vol. 34 (11), pp. 8–14.
9. Pudovikov S.A. Bezrazbornaya tekhnologiya ul'trazvukovogo kontrolya osei kolesnykh par pri remonte podvizhnogo sostava [Non-Disassembled Technology of Ultrasonic Control of Wheelset

Axles During Rolling Stock Repairs], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2005, no. 1, pp. 108–113. (In Russian)

10. Korosteleva E. Yu., Tolmachev I. I. Primenenie magnitoporoshkovogo i vikhretokovogo metodov kontrolya dlya detalei i uzlov lokomotivov i motorvagonnogo podvizhnogo sostava [Application of Magnetic Powder and Eddy Current Control Methods for Parts and Assemblies of Locomotives and Motor-Car Rolling Stock], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering]*, 2008, vol. 312, no. 2S, pp. 264–267. (In Russian)

11. Akhmedzhanov R. A., Makarochkin V. V., Rodchenko L. A. O sovershenstvovanii ul'trazvukovogo kontrolya osi kolesnoi pary vagona [On Improving the Ultrasonic Control of the Axle of a Wagon Wheelset], *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2014, no. 2 (18), pp. 7–18. (In Russian)

12. Vorobev A. A., Karpov V. A. Analiz nadezhnosti podvizhnogo sostava po rezul'tatam nerazrushayushchego kontrolya [Analysis of Rolling Stock Reliability Based on the Results of Non-Destructive Testing], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Vestnik of Saratov State Technical University]*, 2015, vol. 3, no. 1 (80), pp. 65–70. (In Russian)

13. Maryukhnenko V. S., Pulyakov A. V. Osobennosti kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnogo sostava na khodu poezda [Features of Monitoring the Technical Condition of Rolling Stock on the Train], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 272–287. (In Russian)

14. Davydov Yu. A., Plyaskin A. K., Kushniruk A. S. Kontrol' fakticheskogo tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov na osnove diagnostiki [Monitoring of the Actual Technical Condition of Locomotives Based on Diagnostics], *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2018, no. 3 (59), pp. 38–47. (In Russian)

15. Boronenko Yu. P., et al. Analiz metodov izmerenii silovogo vozdeistviya podvizhnogo sostava na put' i sistem tekhnicheskogo kontrolya koles pri dvizhenii poezda [Analysis of Methods for Measuring the Force Effect of Rolling Stock on the Track and Systems of Technical Control of Wheels During Train Movement], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 324–344. (In Russian)

16. Popov V. V., et al. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya gruzovykh vagonov na khodu poezda [Monitoring of the Technical Condition of Freight Cars on the Train] // *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, and Economics]*, 2021, no. 1–2 (92–93), pp. 52–56. (In Russian)

17. Baranov L. A., Burchenkov V. V. Tekhnologiya monitoringa podvizhnogo sostava na osnove distantsionnogo akusticheskogo zondirovaniya [Rolling Stock Monitoring Technology Based on Remote Acoustic Sensing], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 90–100. (In Russian)

18. Jiang Hui, et al. Research and Application of the Railway Vehicle Operation Safety Monitoring (5T) System, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, no. S1, pp. 1–6.

19. Shi Xiaolei, et al. Design of the TPDS Big Data Analysis System, *Railway Locomotive & Car*, 2022, vol. 42, no. 1, pp. 95–98.
20. Qi Miaomiao, et al. Construction Techniques for an Intelligent Recognition Dataset of Railway Freight Car Fault Images, *China Railway*, 2025.
21. Tsaplin A. E. Diagnostika uzlov mekhanicheskoi chasti podvizhnogo sostava s primeneniem kompleksa mashinnogo zreniya [Diagnostics of Components of the Mechanical Part of Rolling Stock Using a Machine Vision System], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2011, no. 2, pp. 41–49. (In Russian)
22. Kazanskij N.L., Popov S.B. Raspredeleonnaya sistema tekhnicheskogo zreniya registratsii zheleznodorozhnykh sostavov [Distributed Vision System for Registration of Railway Trains], *Komp'yuternaya optika [Computer Optics]*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 419–428. (In Russian)
23. Olivier B., et al. A Review of Computer Vision for Railways, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025.
24. Sun Yinong, et al. Machine Vision-Based Method for TFDS Freight Car Fault Image Recognition, 2025.
25. Wei Xiukun, et al. A Review of Machine Vision Applications in State Detection of Rail Transit Systems, *Control and Decision*, 2021, vol. 36 (2), pp. 257–282.

Received: April 20, 2026

Accepted: April 26, 2026

Author's information:

Jieyi SHEN — Postgraduate Student; 787612109@qq.com

Alexey E. TSAPLIN — PhD in Engineering, Associate Professor; tsaplin.alexey@mail.ru

УДК 629.4.01

Статистический анализ возникновения отказов систем тягового привода электроподвижного состава метрополитена

А. А. Кульков, Д. Д. Никонов, Е. Л. Грязнова

Российский университет транспорта, Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: *Кульков А. А., Никонов Д. Д., Грязнова Е. Л.* Статистический анализ возникновения отказов систем тягового привода электроподвижного состава метрополитена // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 149–160. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-149-160

Аннотация

Цель: систематизация и количественная характеристика отказов в системе тягового привода за период с 2020 по 2024 год, выявление основных видов неисправностей и определение приоритетных направлений технических и организационных мероприятий, направленных на снижение частоты внеплановых видов ремонта и оптимизацию общей стоимости владения парком электроподвижного состава.

Методы: применены методы статистического анализа отказов, включая разделение их по типам (электрические, механические, программные), расчет процентного соотношения отказов, анализ временных рядов и количественный анализ между эксплуатационными параметрами и вероятностью отказа. Использованы данные сервисных журналов, диагностических систем и контактных проверок. Дополнительно внедрена методика оценки влияния условий эксплуатации и качества обслуживания непосредственно на параметры надежности. **Результаты:** проведенный анализ позволил определить наиболее уязвимые узлы, элементы систем тягового привода, установить распределение типов отказов (по частоте, сезонности). Выявлены основные причины, в частности износ контактных поверхностей, перегревы системы охлаждения, сбои программного обеспечения. Выявлена значимая связь между нарушением регламентов обслуживания и ростом интенсивности отказов. Благодаря мониторингу ключевых параметров была выявлена возможность нивелирования числа внеплановых отказов. **Практическая значимость:** повышение надежности системы, снижение затрат и доли внеплановых ремонтов. Предложен комплекс мер: модернизация тягового привода, усиленная диагностика, определение интервалов обслуживания по реальному состоянию узлов, автоматизация мониторинга токов и напряжений, переводение тепловизионных и контактных проверок в разряд регулярных.

Ключевые слова: метрополитен, электроподвижной состав, тяговый привод, статистический анализ, отказы, эксплуатация, техническое обслуживание

Введение

Безопасность, надежность, а также эффективность работы метрополитена зависят от технического состояния силовых цепей тягового привода. Система обеспечивает движение подвижного состава, а также является его ключевым узлом. Выход привода из строя влечет серьезные последствия, среди которых — сбои в графике движения, а также рост эксплуатационных расходов и возникновение угрозы пассажирам.

Тяговый электропривод представляет собой сложную многокомпонентную систему, выполняющую функцию преобразования подведенной электрической энергии в направленное механическое движение. В современном электроподвижном

составе этот комплекс объединяет в себе высокоточное электронное оборудование и силовые агрегаты, работающие в условиях высоких динамических нагрузок [3–5, 7–10].

Современный тяговый привод имеет в своем составе следующие элементы:

1. Тяговый электродвигатель (ТЭД) — узел, который служит для приведения поезда в движение. В современной практике предпочтение отдается асинхронным машинам с короткозамкнутым ротором, которые обеспечивают высокие показатели удельной мощности и крутящего момента [3–5].

2. Частотный преобразователь (инвертор) — блок, который преобразует напряжение контактной сети в переменное для ТЭД, а также обеспечивает регулирование частоты и амплитуды тока, плавность разгона, энергоэффективное торможение и работу в режиме рекуперации [4, 5, 8].

3. Микропроцессорная система управления — модуль, который координирует работу всех узлов, непрерывно обрабатывает сигналы с датчиков скорости, тока и положения, реализует сложные алгоритмы управления и поддерживает оптимальные режимы работы при любых условиях [8, 10].

4. Система охлаждения и коммутации включает в себя радиаторы, вентиляторы и силовые контакторы, отвечает за поддержание стабильной рабочей температуры силовых преобразователей и обмоток двигателя, предотвращая износ изоляции и критический перегрев оборудования [9, 10].

5. Механическая тяговая группа состоит из тяговых редукторов и специализированных муфт, которые понижают частоту вращения, осуществляют передачу крутящего момента непосредственно на колесные пары, компенсируя неизбежные при движении смещения [3, 7].

От безотказности каждого из перечисленных звеньев напрямую зависит надежность всей системы. Возможные неисправности варьируются в широком диапазоне, и проблемы не ограничиваются только программными ошибками и кратковременными сбоями датчиков, которые требуют лишь банального перезапуска системы.

Поломка может обернуться сложными механическими повреждениями и проблемами изоляции, которые ведут, в частности, к полной потере тяги. Подобные дефекты вызывают постановку подвижного состава на внеплановый ремонт, поэтому безупречная исправность тягового привода является залогом строгого выполнения графика движения и безопасности эксплуатации транспортного комплекса.

С учетом растущих объемов пассажирских перевозок особенно актуальной становится важность поддержания высоких стандартов технического состояния подвижного состава. Особенно это касается таких крупных городов, как Москва, Санкт-Петербург, Казань и Минск, где в условиях интенсивной работы метрополитенов подвижной состав подвергается значительным эксплуатационным нагрузкам [3, 7, 10].

Профилактическое обслуживание систем тягового привода и их диагностика позволяют продлить срок службы бортового оборудования, снизить риск возникновения неисправностей и обеспечить стабильность и безопасность пассажирских перевозок.

В данной статье представлены результаты статистического анализа причин отказов в системах тягового привода на примере электропоезда модели 81.775 «Москва-2020». Анализ показал основные виды неисправностей за период с 2020 по 2024 год, и на его основе даны рекомендации по их минимизации [2].

Основная часть

В рамках анализа эксплуатационной надежности подвижного состава Московского метрополитена за период с 2020 по 2024 год проведена систематизация и классификация отказов, зарегистрированных в процессе его функционирования на линии. Полученные статистические данные (рис. 1) отчетливо демонстрируют, что высоковольтное оборудование является одним из ключевых источников неисправностей и составляет 30% от общего числа отказов, зафиксированных при техническом обслуживании [2, 7–10].

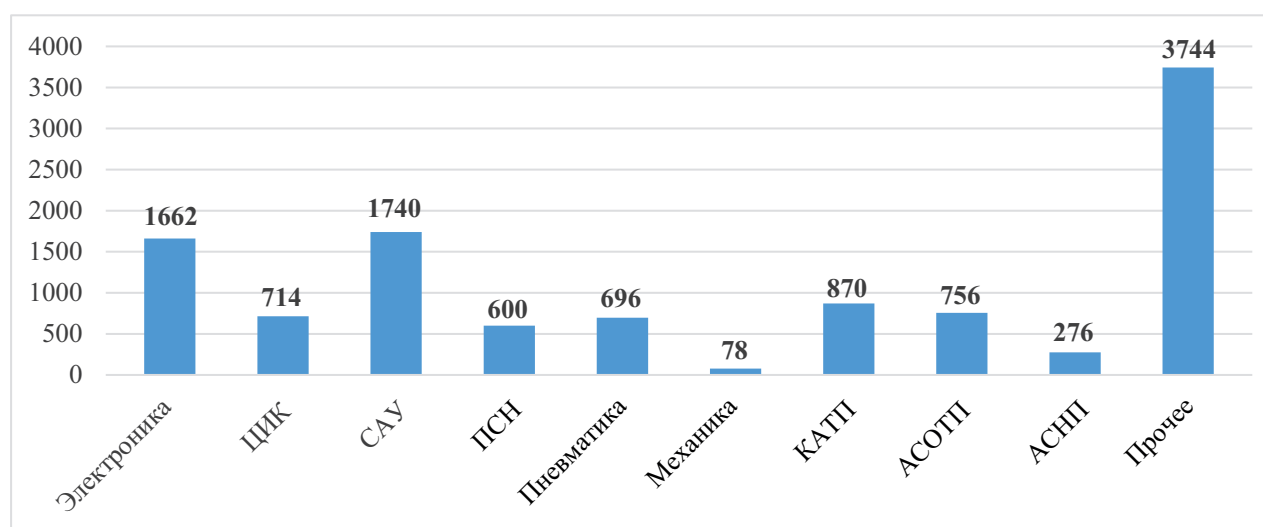


Рис. 1. Общее количество отказов за период с 2020 по 2024 год

Особое внимание обращает на себя тот факт, что в категории высоковольтного оборудования около 28% отказов приходится непосредственно на тяговый привод (рис. 2). Такое процентное соотношение подчеркивает критическую значимость рассматриваемого узла в общей структуре неисправностей высоковольтных систем. Это обстоятельство обуславливает необходимость в пересмотре и усилении мер по диагностике, обслуживанию и профилактике данного комплекса оборудования, а также в потенциальной оптимизации его конструктивных решений.

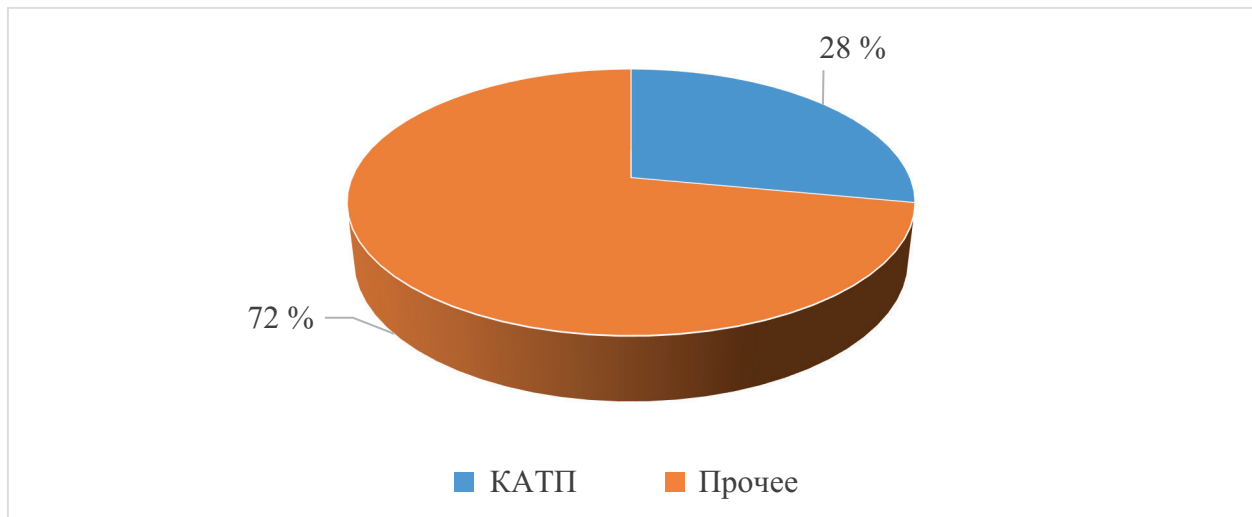


Рис. 2. Диаграмма процентного соотношения отказов тягового привода высоковольтного оборудования

К значительному увеличению эксплуатационных расходов приводит, кроме того, высокая частота отказов тягового оборудования. Особенно актуальна данная проблема для современного электроподвижного состава Московского метрополитена. В результате возрастают затраты на оплату труда, расходные материалы, электроэнергию и прочие нужды, обусловленные регулярным проведением ремонтных работ и оперативным восстановлением вышедших из строя систем. Это крайне негативно сказывается на общей экономической эффективности и снижает операционную готовность парка подвижного состава.

Таким образом, стратегически важными представляются инвестиции в повышение надежности тягового привода, которые позволят оптимизировать эксплуатационные процессы и снизить совокупную стоимость владения парком подвижного состава.

Для дальнейшего проведения статистического анализа сформирована специальная классификация типов отказов, которая позволила систематизировать имеющиеся данные и выявить скрытые закономерности в функционировании оборудования.

Классификация отказов тягового привода

По характеру и уровню проявления (функциональный признак):

- *Функциональные отказы:* характеризуются полной потерей основной тяговой функции. В этом случае привод не способен генерировать крутящий момент, что приводит к невозможности движения или экстренной остановке подвижного состава [8, 10].

- *Частичные отказы:* сопровождаются заметным снижением эксплуатационных характеристик при сохранении базовой работоспособности. Сюда относятся

ухудшение параметров, падение выходной мощности, ограничение максимальной скорости или снижение КПД системы [8, 10].

- *Временные или переходные отказы (сбои)*: представляют собой кратковременные нарушения, вызванные ложным срабатыванием систем защиты, электромагнитными помехами или программными противоречиями. Часто такие инциденты устраняются путем перезагрузки системы управления без механического вмешательства [8, 10].

По физической природе возникновения:

- *Электрические отказы* включают в себя повреждения силовой части, такие как межвитковые короткие замыкания в обмотках двигателя, пробой изоляции, выход из строя силовых IGBT-модулей инвертора или перегорание предохранителей в цепях высокого напряжения.

- *Электронные и программные сбои* охватывают логические ошибки в алгоритмах векторного управления, выход из строя микроконтроллеров, сбои в работе программируемых логических контроллеров (ПЛК) и некорректные показания датчиков тока, частоты или положения ротора.

- *Механические повреждения* связаны с естественным износом или разрушением конструктивных элементов тяговых редукторов, разрушением тел качения в подшипниковых узлах, деформацией валов или нарушением соосности муфт.

- *Тепловые отказы* возникают вследствие нарушения работы системы охлаждения, что ведет к критическому перегреву полупроводников или обмоток, ускоряя износ изоляционных материалов и термическое разрушение компонентов.

- *Отказы из-за внешних факторов* обусловлены агрессивным воздействием окружающей среды, включая проникновение влаги (конденсат), коррозионные процессы, абразивное загрязнение и механические удары посторонними предметами.

По временному периоду и этапу жизненного цикла:

- *Ранние отказы (прирабочные)* проявляются в начальный период, после ввода в эксплуатацию. Как правило, являются следствием производственного брака, конструктивных просчетов или ошибок, допущенных при монтаже и пусконаладке.

- *Отказы в период нормальной эксплуатации* возникают случайным образом в середине расчетного срока службы оборудования. Они имеют практически постоянную интенсивность и труднопредсказуемы.

- *Отказы по причине износа* наступают непосредственно на завершающем этапе жизненного цикла (из-за физического старения материалов), накопления усталостных напряжений металла, выработки ресурса электронных компонентов.

По степени критичности для безопасности движения:

- *Критические (блокирующие)* являются причиной немедленного прекращения работы состава на линии. Требуют буксировки непосредственно в депо и представляют наибольшую угрозу для безопасности движения.

- *Некритические (эксплуатационные)* позволяют продолжить движение (в аварийном или ограниченном режиме, например на пониженной мощности). Ремонт может быть отложен непосредственно до планового захода в депо.

- *Предупреждающие* — начальная стадия развития неисправности. Проявляются через косвенные признаки, среди которых — нехарактерный шум, повышенная вибрация, малые утечки масла или специфический запах. Это свидетельствует о необходимости скорой диагностики.

Источники данных и методика их подготовки

Качество статистики и точность прогнозирования остаточного ресурса напрямую связаны с чистотой и полнотой исходной информации. Процесс сбора данных для анализа отказов тягового привода базируется на следующих источниках.

Регистрационные журналы и сервисная документация депо:

- *Журналы учета неисправностей* содержат первичную информацию о дате, времени и характере выявленной проблемы, а также фиксируют трудозатраты на ее устранение.

- *Ремонтные ведомости и акты о дефектах:* подробные технические отчеты, в которых описывается состояние демонтированных узлов, перечисляются замененные компоненты и указываются выявленные причины выхода из строя после вскрытия агрегатов.

- *Бортовые журналы машинистов (ТУ-152)* содержат субъективные наблюдения персонала о поведении техники в реальных условиях эксплуатации, предшествовавших моменту отказа.

Телеметрические системы и архивы бортовых накопителей:

- *Лог-файлы систем управления:* данные с блоков регистрации параметров движения поезда (РПДП), фиксирующие значения токов, напряжений, температур и частоты вращения в режиме реального времени. Анализ этих записей позволяет восстановить хронологию событий непосредственно перед аварией и выявить первопричину с высокой точностью.

Проведенный анализ основан на комплексной оценке эксплуатационных характеристик подвижного состава метрополитена модели 81.775 «Москва-2020» за четырехлетний период. Главная цель исследования — систематизация и определение категорий отказов, а также установление их статистической значимости.

В ходе сбора данных было зарегистрировано 870 инцидентов, которые сгруппированы в несколько базовых категорий, что позволило выявить основные группы неисправностей [3, 7–10].

К первой группе относятся поломки механических частей, преимущественно узлов, агрегатов, редукторов и муфт системы тягового привода. Всего выявлено около 80 инцидентов, что составляет 16 % от общего числа поломок.

В результате выявления данной категории нами была подтверждена необходимость проведения регулярного технического обслуживания. Подобные критически важные элементы требуют постоянного мониторинга износа. Неправильное функционирование ведет к значительному снижению эффективности работы подвижного состава и ставит под угрозу безопасность эксплуатации всего транспортного комплекса (рис. 3).



Рис. 3. Люфт выходного вала от тягового редуктора к муфте.

Фото: Д. Д. Никонова

Ко второй группе были отнесены сбои электрических цепей, включающие в себя как управляющие, так и силовые контуры. Это самый распространенный вид нарушений работы тягового привода — 300 эпизодов отказов и 40% от общего числа.

Причины данных поломок обусловлены многими факторами, когда внутренние производственные дефекты компонентов усугубляются внешними эксплуатационными воздействиями (рис. 4). К числу последних отнесены значительные колебания температурного режима и повышенная влажность окружающей среды. Это необходимо учитывать при разработке стратегий повышения надежности электрических систем.

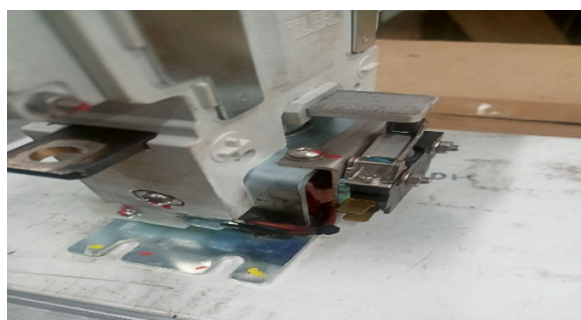


Рис. 4. Сгоревший варистор зарядного контактора, тягового привода.

Фото: Д. Д. Никонова

К третьей группе относятся нарушения функционирования системы охлаждения. Данный комплекс играет важную роль в рамках обеспечения нормального

температурного режима. Перегрев тягового привода нарушает его стабильную работу, а также приводит к повышению тепловой нагрузки на остальные элементы системы (рис. 5). Это сокращает ресурс оборудования и повышает риск внезапных остановок подвижного состава.

В течение рассматриваемого периода было зафиксировано приблизительно 210 случаев таких отказов, то есть 30% от общего числа зарегистрированных неисправностей.

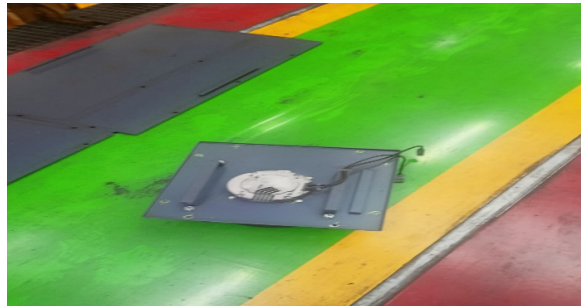


Рис. 5. Неисправный вентилятор охлаждения силового инвертора.

Фото: Д. Д. Никонова

К четвертой группе относятся прочие категории отказов — 122 случая и порядка 14% от общего объема. В нее входит широкий спектр дефектов, в частности программные сбои в интегрированных системах управления (рис. 6), что требует повышения устойчивости программного обеспечения.

Также в эту категорию входят различные виды механических повреждений кабельной инфраструктуры и электрических соединений, требующих повышенного внимания к качеству монтажа и надежной защите такого оборудования.

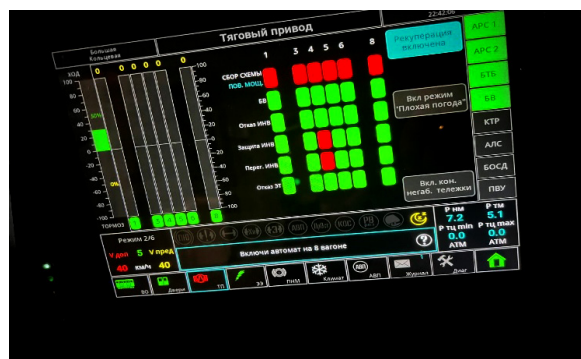


Рис. 6. Некорректное отображение информации состояния тягового привода.

Фото: Д. Д. Никонова

Таким образом, статистика 870 зарегистрированных отказов тягового привода подвижного состава метро модели 81.775 «Москва-2020» за четырехлетний период формирует структуру распределения неисправностей (см. таблицу).

ТАБЛИЦА. Процентное соотношение отказов групп оборудования тягового привода

Группа(-ы) неисправностей	Процентное соотношение	Количество случаев	Факторы возникновения
Отказы механических частей	16%	139	Повышенный износ
Неисправности электрических цепей	40%	348	Перегрев, КЗ
Неисправности системы охлаждения	30%	261	Клин вентиляторов охлаждения
Прочие виды неисправностей	14%	122	Программные сбои

Представленные данные показывают доминирующее влияние непосредственно на надежность тягового привода неисправностей электрических цепей и систем охлаждения (рис. 7). Указанные выводы могут служить основой разработки адресных программ профилактического обслуживания и модернизации. Их целью является повышение эксплуатационной надежности, снижение количества внеплановых остановок подвижного состава.

**Рис. 7.** Диаграмма процентного соотношения групп отказов тягового привода

Выводы

На основании анализа отказов систем тягового привода выявлено, что наиболее частыми видами неисправностей, которые могут возникнуть при эксплуатации состава на линии, являются неисправности охлаждения и электрических цепей.

Рассмотренный в статье анализ позволяет выявить причины и очаги возникновения неисправностей тягового привода, а также выработать стратегию технического обслуживания и ремонта, которая минимизирует их возникновение.

Данными, которые были получены в результате анализа, обусловлена необходимость более тщательного мониторинга технического состояния тягового

привода (при плановом техническом обслуживании, ремонте парка подвижного состава). Помимо этого, возникает необходимость усиления контроля состояния электрической составляющей и систем охлаждения тягового привода. Кроме того, результаты проведенного анализа демонстрируют необходимость совершенствования современного регламента планового технического обслуживания и ремонта современных вагонов метро, а также переобучения рабочего персонала.

Список источников

1. Кори́тов А. Ю., Кульков А. А. Как оценивать качество капитального ремонта // Мир транспорта. 2014. Т. 12, № 2 (51). С. 110–113. EDN SFRIEN
2. Куликов М. Ю., Воронин Н. Н., Гуцин Д. С. Причины отказов тормозных систем поездов Московского метрополитена // Транспортное машиностроение. 2025. № 2 (38). С. 49–54. DOI: 10.30987/2782-5957-2025-2-49-54. EDN NDCFKE
3. Калиничев В. П. Метрополитены. М.: Транспорт, 1988. 279 с.
4. Ле С. Х., Тулупов В. Д. Сравнительная технико-экономическая эффективность вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода // Электротехнические и информационные комплексы и системы. Т. 11, № 3. 2015. С. 30–38.
5. Ле С. Х., Тулупов В. Д. Анализ и оценка энерго-экономической эффективности вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2015. Т. 15, № 3. С. 74–81.
6. Кори́тов А. Ю., Кульков А. А., Скороход А. А. Оценка качества капитального ремонта ПС // Мир транспорта. 2012. Т. 10, № 2 (40). С. 130–133. EDN PAMMZP
7. Панкратов С. А. Теория надежности транспортных систем. М.: Наука, 2021. 312 с.
8. Акимов А. В. Мониторинг и диагностика электрооборудования вагонов метрополитена // Вестник транспорта. 2022. № 5. С. 12–18.
9. Шапшал А. С., Кравчук В. А. Повышение эксплуатационной надежности тяговых систем электроподвижного состава на основе мониторинга теплового состояния // Наука и техника транспорта. 2023. № 1. С. 44–50.
10. Ершков О. Н., Лаврентьев И. В. Методы оценки и прогнозирования надежности узлов электропоездов метрополитена нового поколения // Транспорт: наука, техника, управление. 2024. № 4. С. 22–28.

Дата поступления: 12.04.2026

Дата публикации: 24.05.2026

Контактная информация:

КУЛЬКОВ Анатолий Александрович — доктор техн. наук, профессор; pow12@mail.ru

НИКОНОВ Даниил Дмитриевич — аспирант; nikonov.daniil.2002@gmail.com

ГРЯЗНОВА Елизавета Леонидовна — аспирант; gryaznovae.l@mail.ru

Statistical Analysis of Failures in the Traction Drive Systems of the Moscow Metro Electric Rolling Stock

A. A. Kul'kov, D. D. Nikonov, E. L. Gryaznova

Russian University of Transport (MIIT), bldg. 9, 9 Obraztsova st., Moscow, 127994, Russia

For citation: *Kul'kov A. A., Nikonov D. D., Gryaznova E. L. Statistical Analysis of Failures in the Traction Drive Systems of the Moscow Metro Electric Rolling Stock // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 149–160. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-149-160 (In Russian)*

Abstract

Objective: to systematize, quantify failures in traction drive system for period of 2020–2024, identify main types of malfunctions, establish priority areas for technical and organizational measures aimed at reducing frequency of unscheduled repairs and optimizing the total cost of the electric rolling stock fleet in possession.

Methods: statistical analysis of failures was used including categorization into types (electrical, mechanical, and software), calculation of percentage of failures, time series analysis, quantitative analysis between operational parameters and the probability of failure. Data from service logs, diagnostic systems, contact checks was used, and a method was developed to assess the impact of operating conditions and service quality on reliability parameters. **Results:** the analysis results allowed us to identify the most vulnerable components and systems of the traction drive, determine distribution of failure types. **Practical significance:** there is a need to develop reasonable recommendations for diagnostics, prevention, and modernization of traction drive units, implementation of regular thermal imaging, contact checks, automated monitoring of currents, voltages, strengthening of diagnostics programs, adaptation of maintenance intervals based on the actual condition. The implementation of proposed measures can improve the system's reliability, reduce the number of unscheduled repairs, and decrease the operational costs of the electric rolling stock fleet.

Keywords: subway, electric rolling stock, traction drive, statistical analysis, failures, operation, maintenance

References

1. Korytov A. Yu., Kul'kov A.A. Kak otsenivat' kachestvo kapital'nogo remonta [How to Assess the Quality of Capital Repairs], *Mir transporta [World of Transport and Transportation]*, 2014, vol. 12, no. 2 (51), pp. 110–113. EDN SFRIEH (In Russian)
2. Kulikov M. Yu., Voronin N.N., Gushchin D.S. Prichiny otkazov tormoznykh sistem poezdov Moskovskogo metropolitena [Reasons for Failures of the Brake Systems of Moscow Metro Trains], *Transportnoe mashinostroenie [Transport Engineering]*, 2025, no. 2 (38), pp. 49–54. EDN NDCFKE (In Russian)
3. Kalinichev V.P. Metropoliteny [Metropolitans], Moscow, Transport, 1988, 279 p. (In Russian)
4. Le X.H., Tulupov V.D. Sravnitel'naya tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' vagonov metropolitena s al'ternativnymi sistemami tyagovogo elektroprivoda [Comparative Technical and Economic Efficiency of Subway Cars with Alternative Traction Electric Drive Systems], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy [Electrotechnical and Information Complexes and Systems]*, vol. 11, no. 3, 2015, pp. 30–38. (In Russian)
5. Le X.H., Tulupov V.D. Analiz i otsenka energo-ekonomicheskoy effektivnosti vagonov metropolitena s al'ternativnymi sistemami tyagovogo elektroprivoda [Analysis and Evaluation of the

Energy and Economic Efficiency of Subway Cars with Alternative Traction Electric Drive Systems], *Vestnik YuUrGU. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], vol. 15, no. 3, pp. 74–81. (In Russian)

6. Korytov A. Yu., Kul'kov A. A., Skorokhod A. A. Otsenka kachestva kapital'nogo remonta PC [Assessment of the Quality of Capital Repairs of the PC], *Mir transporta [World of Transport and Transportation]*, 2012, vol. 10, no. 2 (40), pp. 130–133. EDN PAMMZP (In Russian)

7. Pankratov S. A. Teoriya nadezhnosti transportnykh sistem [Theory of Reliability of Transport Systems], Moscow, Nauka Publishers, 2021, 312 p. (In Russian)

8. Akimov A. V. Monitoring i diagnostika elektrooborudovaniya vagonov metropolitena [Monitoring and Diagnostics of Subway Car Electrical Equipment], *Vestnik Transporta [Journal of Transport]*, 2022, no. 5, pp. 12–18. (In Russian)

9. Shapshal A. S., Kravchuk V. A. Povyshenie ekspluatatsionnoj nadezhnosti tyagovykh sistem elektropodvizhnogo sostava na osnove monitoringa teplovogo sostoyaniya [Improving the Operational Reliability of Traction Systems of Electric Rolling Stock Based on Monitoring the Thermal State], *Nauka i tekhnika transporta [Science and Technology of Transport]*, 2023, no. 1, pp. 44–50. (In Russian)

10. Ershkov O. N., Lavrentiev I. V. Metody otsenki i prognozirovaniya nadezhnosti uzlov elektropoezdov metropolitena novogo pokoleniya [Methods for Assessing and Predicting the Reliability of Nodes of New Generation Subway Electric Trains], *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: Science, Technology, Management]*, 2024, no. 4, pp. 22–28. (In Russian)

Received: April 12, 2026

Accepted: May 24, 2026

Author's information:

Anatoly A. KUL'KOV — Dr. Sci in Engineering, Professor; pow12@mail.ru

Daniil D. NIKONOV — Postgraduate Student; nikonov.daniil.2002@gmail.com

Elizaveta L. GRYAZNOVA — Postgraduate Student; gryaznovae.l@mail.ru

УДК 625.144.4

Сокращение транспортных расходов на доставку рельсовых плетей за счет внедрения промежуточных складов

Е. В. Пакулина, А. А. Мигров, А. М. Перепеченов, И. Ю. Новосельский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Пакулина Е. В., Мигров А. А., Перепеченов А. М., Новосельский И. Ю. Сокращение транспортных расходов на доставку рельсовых плетей за счет внедрения промежуточных складов // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 161–175. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-161-175

Аннотация

Рельсовые плети являются важным ресурсом для строительства и ремонта пути, потребность в котором постоянно растет. Их доставка к местам работ должна осуществляться своевременно. Так как участки производства работ или строительства магистралей не располагают местами промежуточного хранения рельсовых плетей, логистическая цепь обеспечения ресурсами часто работает с задержками, прямо влияющими на сроки производства работ и транспортные расходы. **Цель исследования:** сокращение транспортных расходов за счет внедрения промежуточных складов рельсовых плетей. **Методы:** использованы методы теории графов. Решена задача поиска p -медиан на взвешенном графе, представляющем транспортную сеть. Для поиска оптимальных мест расположения складов применен алгоритм Флойда — Уоршелла. **Результаты:** выполнен анализ логистической цепи поставки рельсовых плетей для путевых работ, выявлены и проанализированы основные недостатки существующей системы. Предложен и обоснован способ оптимизации логистической цепи за счет внедрения в цепь промежуточных складов рельсовых плетей. **Практическая значимость:** применение промежуточных складов позволит сократить транспортные издержки, уменьшить продолжительность доставки плетей к местам путевых работ и повысить равномерность загрузки рельсосварочных предприятий.

Ключевые слова: логистика, путевые работы, рельсовые плети, обеспечение ресурсами путевых работ, логистическая цепь поставки рельсовых плетей, теория графов, промежуточный склад рельсовых плетей

Введение

Железнодорожный путь как ключевой элемент инфраструктуры подвергается значительным и непрерывным нагрузкам, что обуславливает необходимость его регулярного обновления и ремонта. В современных условиях для путевых работ используют рельсовые плети длиной 800 м, что обусловлено их улучшенными техническими характеристиками и меньшими эксплуатационными затратами по сравнению с 25-метровыми рельсами. Помимо ремонтных работ, строительство высокоскоростных магистралей ставит задачу поставки больших объемов рельсовых плетей, которые должны доставляться к местам работ своевременно и в требуемом объеме.

Текущая схема логистики рельсовых плетей

Рельсовые плети являются уникальным грузом, его доставка к местам путевых работ представляет собой логистический процесс, в котором участвует значительное число структурных подразделений ОАО «РЖД». Осуществление этой доставки сопряжено с рядом сложностей.

1. *Дефицит специализированного подвижного состава.* Ввиду значительной длины перевозка рельсовых плетей возможна только специализированными рельсовозными составами (далее — РВС), которые имеют строгие ограничения по маршрутам движения. Часто эти составы простаивают из-за дефицита локомотивов, что, в свою очередь, приводит к простоям рельсосварочных предприятий (далее — РСП). Например, на ведущем предприятии Октябрьской железной дороги, РСП-1, основными причинами задержек поставки рельсовых плетей потребителям и простоев предприятия за последние несколько лет являлись нехватка РВС и несвоевременная поставка 100-метровых рельсов с металлургического комбината (далее — МК) (рис. 1).

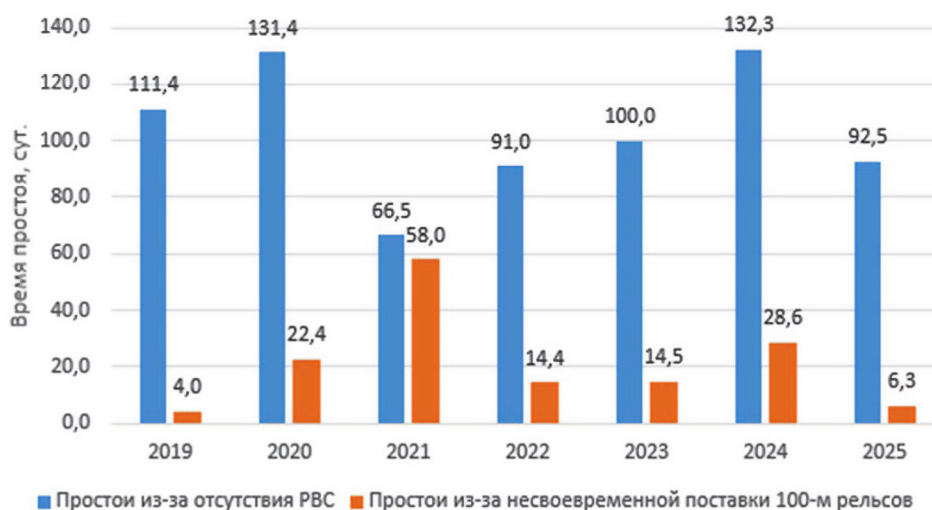


Рис. 1. Распределение простоев предприятия РСП-1 по годам и причинам, сут.
(по данным РСП-1 за 2019–2025 годы)

2. *Доставка рельсовых плетей привязана к технологии укладки и к «окнам» в движении поездов, выделяемым для производства путевых работ.* Задержка напрямую влияет на выполнение всего объема работ и приводит к недоиспользованию времени «окна». Своевременность выполнения путевых работ зависит от множества факторов. К ним относятся: надежность составляющих технологического процесса, эффективность использования «окон» в поездном движении, соблюдение плановой продолжительности работ и т. д. В исследовании [1] на основе отчетных данных ОАО «РЖД» по проведению путевых работ выявлены и классифицированы факторы, влияющие на соблюдение плановой продолжительности путевых работ (рис. 2)



Рис. 2. Схема факторов, влияющих на своевременность выполнения путевых работ

Влияние этих факторов на своевременность выполнения путевых работ неодинаково. Хотя проблемы с несвоевременной доставкой рельсовых плетей возникают относительно редко, но они нарушают установленные цепи поставок, влияют на перевозочный процесс и соблюдение плановой продолжительности путевых работ.

3. *Из-за специфики крепления и риска бокового смещения плетей, рельсовозные составы движутся со значительными ограничениями скорости (40–80 км/ч), что создает сложности с выделением «ниток» для проезда таких составов при планировании графика движения поездов.*

4. *Необходимость соблюдения температурного режима при выгрузке рельсовых плетей на участке путевых работ.* Выгрузка плетей на участке путевых работ разрешена в определенном температурном диапазоне (от –10 до +30 °С). В случае отклонения температуры работы приостанавливаются, что приводит к вынужденным простоям РВС и нарушению производственных планов исполнителей работ.

5. *Проблемы, связанные с хранением рельсовых плетей.* Доставленные рельсовые плети выгружают внутрь колеи или на обочину пути. При этом количество временно хранящихся плетей строго ограничено. При таком хранении рельсовые плети подвергаются воздействию атмосферных осадков, изменений температуры и механическим воздействиям, что ухудшает эксплуатационные характеристики плетей.

6. *Неравномерность изготовления и потребления рельсовых плетей.* В настоящее время готовые рельсовые плети доставляются напрямую от РСП к исполнителям путевых работ (путевые машинные станции, далее — ПМС) в соответствии с предварительными заявками. Логистическая цепь изготовления и поставки

рельсовых плетей к местам путевых работ состоит из следующих этапов (рис. 3): производство 100-метровых рельсов на МК; отгрузка и доставка рельсов на РСП; прием и разгрузка рельсов на предприятии; производство рельсовых плетей; отгрузка и доставка готовой продукции ПМС. Поставка рельсовых плетей производится в объемах, установленных титулами ремонта пути на текущий год.

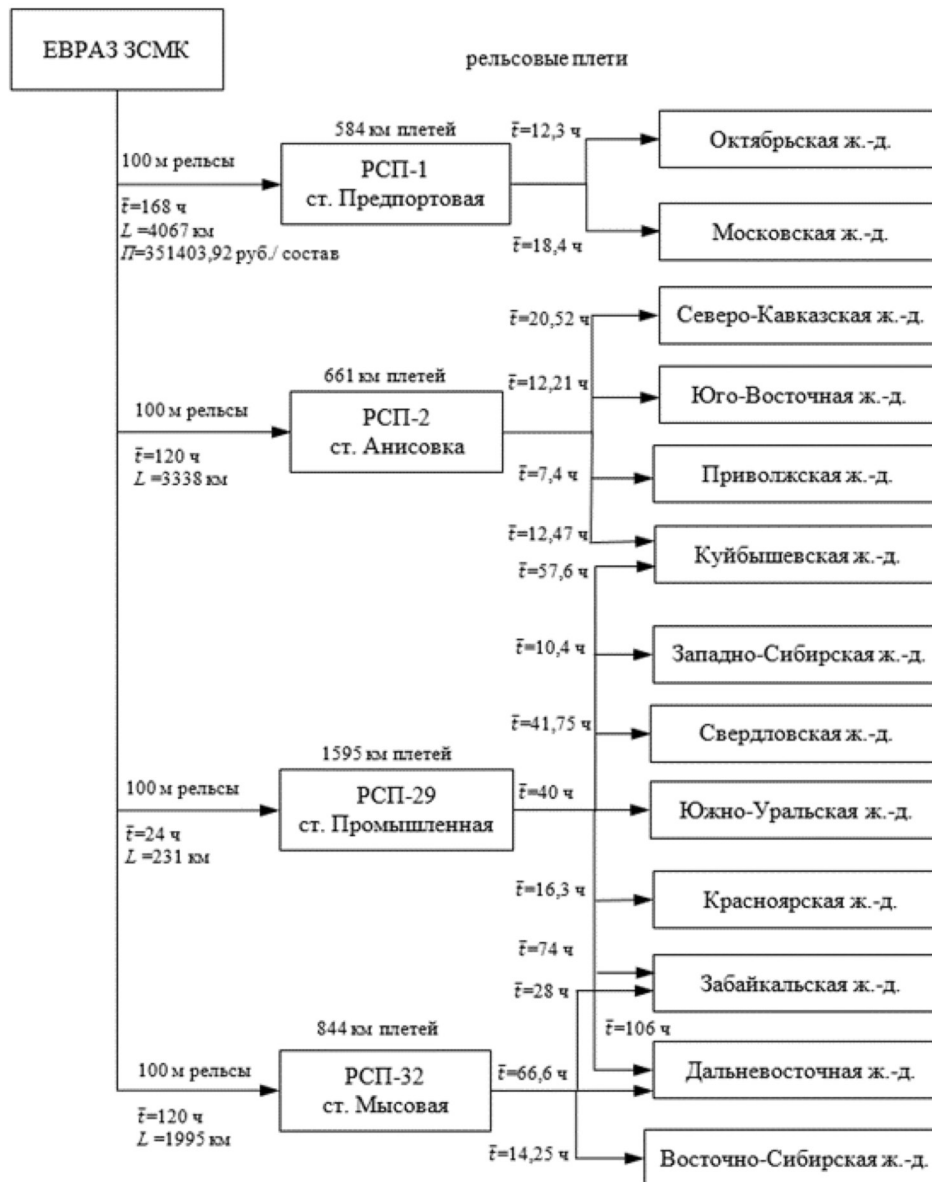


Рис. 3. Схема организации поставки рельсовых плетей для путевых работ

Предприятиями по производству рельсовых плетей из 100-метровых рельсов являются: РСП-1 (ст. Предпортовая, Октябрьская ж.-д.), РСП-2 (ст. Анисовка, Приволжская ж.-д.), РСП-29 (ст. Промышленная, Западно-Сибирская ж.-д.) и РСП-32 (ст. Мысовая, Восточно-Сибирская ж.-д.). Согласно отчетным данным ОАО «РЖД», общий объем поставки рельсовых плетей для путевых работ в 2025 году составил 3684 км (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Потребности и объемы поставки рельсовых плетей из 100-метровых рельсов для путевых работ в 2025 году

Предприятие	Загрузка производства, %	Объем поставки, км	Среднее плечо доставки, км	Средняя стоимость доставки, руб. за состав	Среднее время доставки, ч
РСП-1	61	584	323	4 393 543	15,3
РСП-2	46	661	598	6 293 852	18,3
РСП-29	90	1595	1671	10 744 050	31,4
РСП-32	59	844	2528	20 128 000	40,1

Однако объемы отгрузки плетей рельсосварочными предприятиями распределены неравномерно. Наиболее загруженными являются РСП-29 (1595 км) и РСП-32 (844 км), обслуживающие Восточный полигон железных дорог, что связано с большими объемами путевых работ на участках, а также со значительной площадью территории, на которой они выполняются. Таким образом, два предприятия — РСП-29 и РСП-32 — являются основными поставщиками рельсовых плетей для нескольких железных дорог.

Отмечается и существенная разница в загрузке рельсосварочных предприятий. Так, годовая загрузка производственных мощностей РСП-1, обеспечивающего нужды двух железных дорог, составляет всего 61 %, в то же время РСП-29, обслуживающее семь железных дорог, функционирует на полную мощность, достигая 90 % загрузки производства. Возникающая неравномерность загрузки РСП обусловлена не столько разницей в производственных мощностях рельсосварочных предприятий, сколько географией путевых работ.

Географическое расположение объектов путевых работ приводит к существенным различиям и в плечах доставки. Среднее плечо доставки РСП-1 и РСП-2 находится в диапазоне 323–598 км, тогда как для РСП-29 и РСП-32 эти показатели достигают 1671 и 2528 км соответственно (рис. 4). Значительная дальность приводит к большим транспортным затратам на перевозку рельсовых плетей.

Анализ текущей системы логистики рельсовых плетей для путевых работ позволил выявить ряд существенных проблем:

- неравномерность распределения объемов отгрузки между рельсосварочными предприятиями;
- неравномерность среднего плеча доставки;
- высокие транспортные расходы на перевозку рельсовых плетей.

Для повышения равномерности загрузки рельсосварочных предприятий, обеспечения стабильности поставки рельсовых плетей, уменьшения транспортных расходов и сохранения качества плетей предлагается разместить на сети

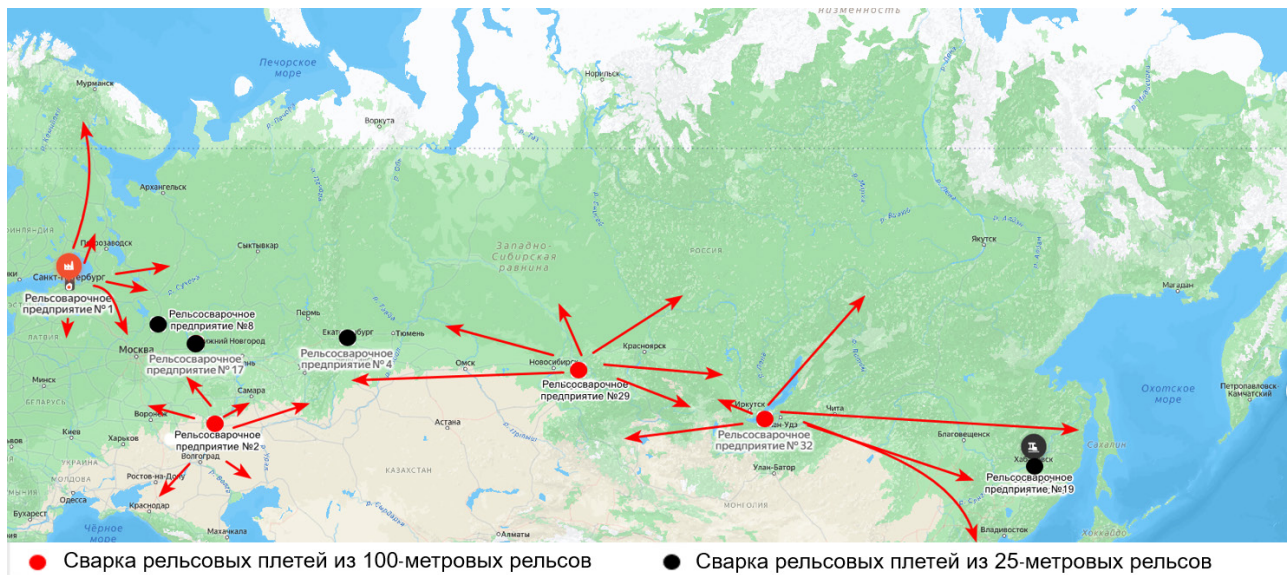


Рис. 4. Схема поставки рельсовых плетей на сети железных дорог РФ

железных дорог РФ промежуточные склады рельсовых плетей. При этом возникает несколько научных задач (рис. 5): необходимо определить количество промежуточных складов, вместимость каждого из них и решить вопрос об оптимальном месте расположения складов. Часть задач уже решалась различными исследователями ранее. Например, определению вместимости склада ресурсов для путевых работ были посвящены работы [2, 3]. Количество промежуточных складов для каждого рельсосварочного предприятия зависит от максимальной вместимости одного склада и оптимального расстояния от склада до участков работ. Можно предположить, что для каждого рельсосварочного предприятия потребуется не менее двух-трех промежуточных складов. Данное исследование посвящено задаче определения оптимальных мест расположения промежуточных складов рельсовых плетей.

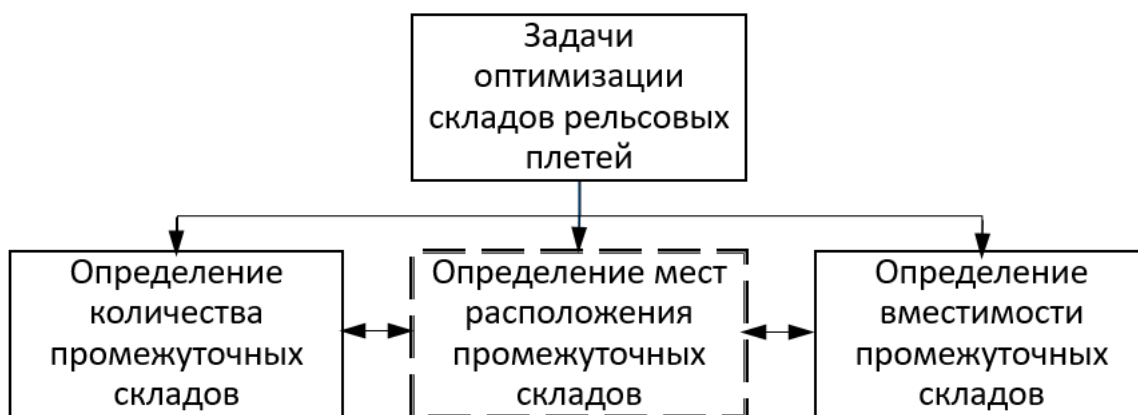


Рис. 5. Классификация задач, связанных с размещением складов рельсовых плетей на сети железных дорог

Научная гипотеза исследования заключается в том, что внедрение в логистическую цепь поставки рельсовых плетей для путевых работ промежуточных складов приведет к снижению транспортных расходов.

Материалы и методы

Задача определения оптимального расположения промежуточных складов рельсовых плетей обычно решается применением комбинаторных [4, 5] или эвристических [6, 7] алгоритмов. Основная идея комбинаторных алгоритмов состоит в использовании конечности множества допустимых решений и замене полного их перебора сокращенным (направленным перебором). Комбинаторные алгоритмы основаны на последовательном разбиении множества на подмножества и оценке получаемых подмножеств. Эвристический алгоритм — это алгоритм, правильность которого для всех возможных случаев не доказана, но про который известно, что он дает достаточно хорошее решение в большинстве случаев [6].

Задача определения мест размещения складов изучалась в работах [8–12]. В основе решения задачи лежит теория графов. Граф описывается с помощью конечного множества вершин V и множества ребер R , соединяющих пары вершин — $G = (V, R)$ [13, 14, 15]. Сеть железных дорог представляется в виде взвешенного графа, узлы которого — места проведения путевых работ, ребра — кратчайшие расстояния между участками. Для определения оптимального места расположения промежуточного склада требуется найти такую вершину, для которой сумма кратчайших расстояний до всех остальных вершин графа была бы минимальной. Оптимальное место расположения склада называется p -медианой графа.

Формализовать целевую функцию решения задачи можно в следующем виде:

$$F = \sum_{i=1}^n d_i \cdot v_i \rightarrow \min$$

при ограничении $V \geq \sum_{i=1}^n v_i$ и граничных условиях: $d_i \geq 0, v_i \geq 0$;

где $i = 1, \dots, n$ — количество узлов в графе;

d_i — кратчайшее расстояние до i -го узла;

v_i — потребность в i -м узле, км пути;

V — суммарная потребность в плетях, км в год.

Оптимизация поиска мест расположения промежуточных складов предполагает наличие данных о расстояниях между участками работ и их последующее представление в виде матрицы кратчайших расстояний. Для этого был создан специальный программный модуль, который выполняет расчеты согласно Тарифному руководству № 4 [16], используемому для определения тарифных расстояний при железнодорожных перевозках грузов, пассажиров и грузобагажа между станциями (рис. 6).

Станция	КАРМАК	ВАГАЙ	КАМЕНСК-УРАЛЬС...	КАБАЛУД	ПЕРЬ II	ЕРГАЧ	ЛЕК	ИРЕНСКИЙ	БОЙЦЫ
КАРМАК	0	185	228	845	666	588	506	575	353
ВАГАЙ	185	0	413	1030	851	773	691	760	538
КАМЕНСК-УРАЛЬСКИЙ	228	413	0	660	481	403	321	390	168
КАБАЛУД	845	1030	660	0	179	257	339	270	492
ПЕРЬ II	666	851	481	179	0	78	160	91	313
ЕРГАЧ	588	773	403	257	78	0	238	169	235
ЛЕК	506	691	321	339	160	238	0	251	153
ИРЕНСКИЙ	575	760	390	270	91	169	251	0	222
БОЙЦЫ	353	538	168	492	313	235	153	222	0
ВИЛИМБАЙ	344	529	159	501	322	244	162	231	49
СУЗГУН	260	347	488	1105	926	848	766	835	613
ОЗЕРО АБРАМОВСКОЕ	284	371	512	1129	950	872	790	859	637
ИГЛЬ	658	745	886	1503	1324	1246	1164	1233	1011
КУЙБАС	781	966	553	1164	1025	947	865	934	712
ДЖАБЫК	708	893	480	1131	952	874	792	861	639
ИКОВКА	455	640	227	887	708	630	548	617	395
ТРОИЦК	510	695	282	933	754	676	594	663	441
БУСКУЛЬ	736	921	508	1159	980	902	820	889	667
МУСЛЮМОВО	330	515	102	762	583	505	423	492	270
БАЛАНДИНО	364	549	136	796	617	539	457	526	304
БУЗУЛУК	1483	1668	1255	1218	1397	1475	1421	1488	1268
НОВОСЕРГИЕВСКАЯ	1367	1552	1139	1310	1489	1416	1334	1403	1181

Рис. 6. Фрагмент матрицы кратчайших расстояний между участками путевых работ, рассчитанный при помощи созданной программы

Для решения задачи определения оптимального места расположения промежуточных складов был разработан программный модуль на языке Java (рис. 7). На вход модуля подается матрица смежности, описывающая кратчайшие расстояния между участками путевых работ и вектор потребностей рельсовых плетей на каждом участке. Модуль строит граф и выполняет расчет, используя комбинаторный алгоритм Флойда — Уоршелла.

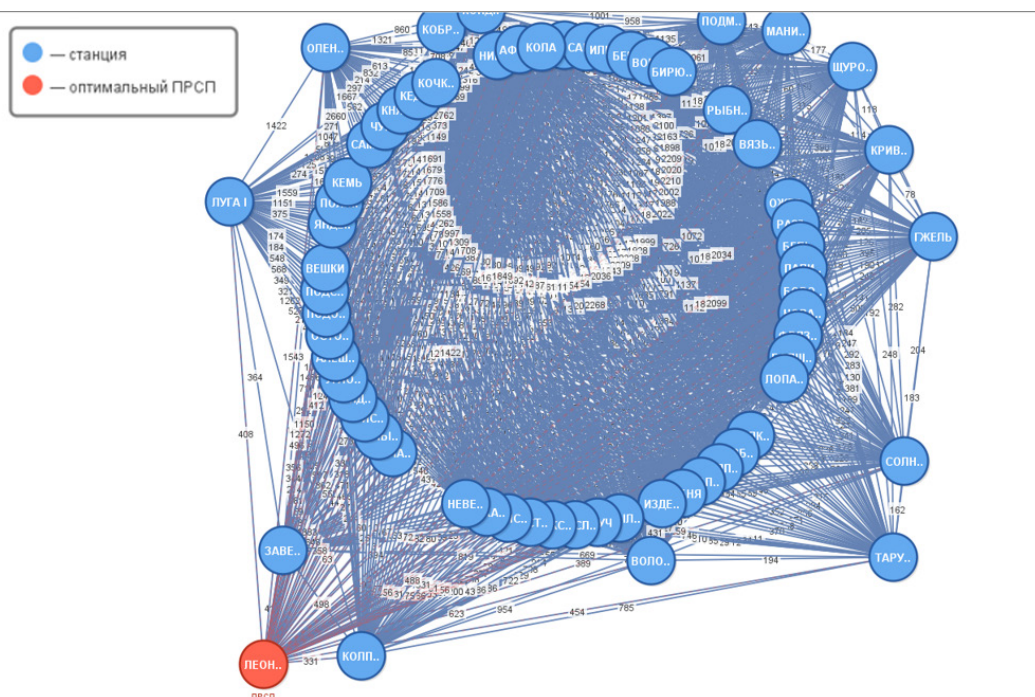


Рис. 7. Граф с оптимальными местами промежуточных складов, определенными в созданной программе

В настоящее время определение транспортных затрат на перевозку рельсовых плетей в места путевых работ производится по Тарифному руководству № 1 [17]. Провозная плата формируется на основе типа груза, вида подвижного состава, способа отправки, а также дополнительных коэффициентов, учитывающих особенности конкретной перевозки.

Для расчета провозной платы на перевозку рельсовых плетей используют следующую зависимость:

$$П = Т \cdot K_{\text{кл}} \cdot K_{\text{гр}} \cdot K_{\text{о}} \cdot K_{\text{и}},$$

где T — тариф, который определяется согласно расстоянию перевозки, руб.;

$K_{\text{кл}}$ — коэффициент, учитывающий класс груза;

$K_{\text{гр}}$ — коэффициент, учитывающий род груза;

$K_{\text{о}}$ — коэффициент, учитывающий вид отправки (повагонная/групповая/маршрутная);

$K_{\text{и}}$ — процент индексации тарифов на грузовые перевозки в текущий период.

Например, при перевозке рельсовых плетей на расстояние 263 км транспортные расходы будут составлять $П = 37580 \cdot 1,74 \cdot 1,05 \cdot 0,85 \cdot 1,1 = 64195,8$ руб. за один вагон.

Результаты и обсуждение

Согласно данным по распределению участков работ и потребности в рельсовых плетях за 2025–2027 годы, полученным от ОАО «РЖД», были определены места оптимального расположения промежуточных складов рельсовых плетей.

Результаты расчета для наиболее загруженного РСП-29, поставляющего рельсовые плети для Восточного полигона, представлены на рис. 8.

На основе данных о местоположении промежуточных складов рельсовых плетей были рассчитаны годовой пробег РВС и суммарные затраты на доставку в течение года (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Параметры доставки рельсовых плетей с учетом промежуточных складов по РСП-29 за 2025 год

Количество промежуточных складов	Место расположения промежуточных складов	Суммарный пробег РВС, рейсо-км	Суммарная стоимость доставки плетей, руб.
1	Московка	87 112,8	859 650 184,4
2	Кунавино, Яя	45 218,7	552 985 094,5
3	Кочнево, Уяр, Кунавино	36 801,3	402 357 539

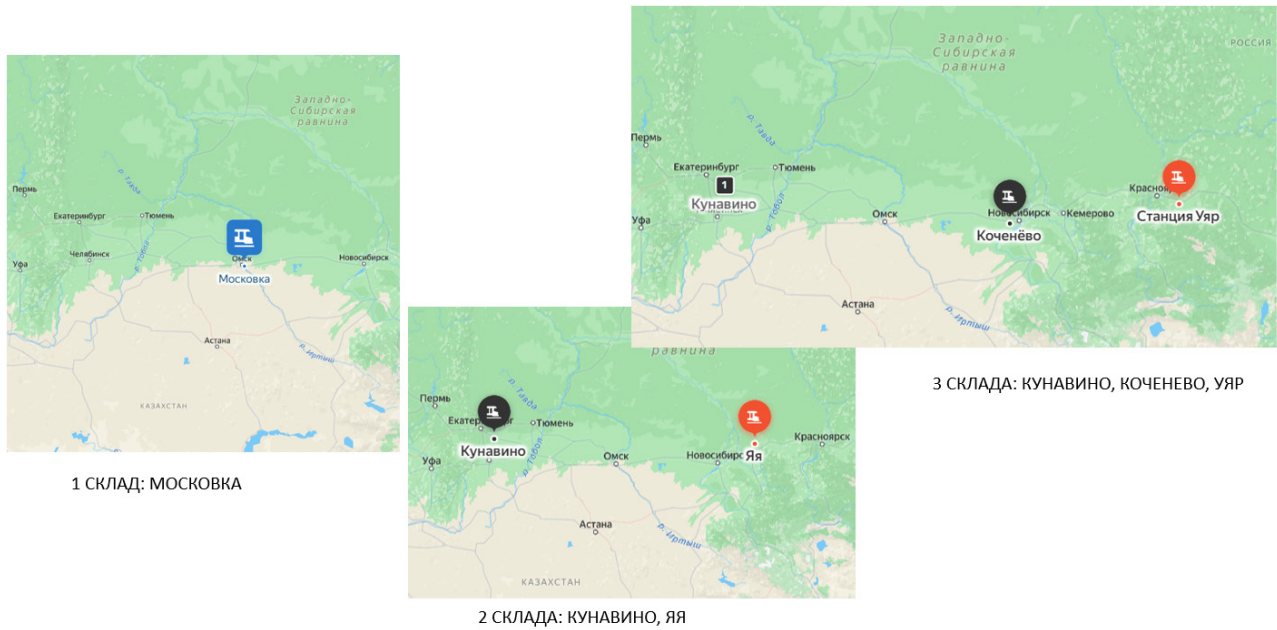


Рис. 8. Оптимальные места расположения промежуточных складов рельсовых плетей для РСП-29

На рис. 9 показаны величины транспортных расходов на доставку рельсовых плетей без промежуточных складов и при предлагаемом количестве складов. Согласно выполненным расчетам, сокращение транспортных расходов при одном складе составит $\Delta C_1 = 221\,052\,778$ руб., при двух складах $\Delta C_2 = 527\,717\,868$ руб., а при трех складах $\Delta C_3 = 678\,345\,423$ руб. за год.

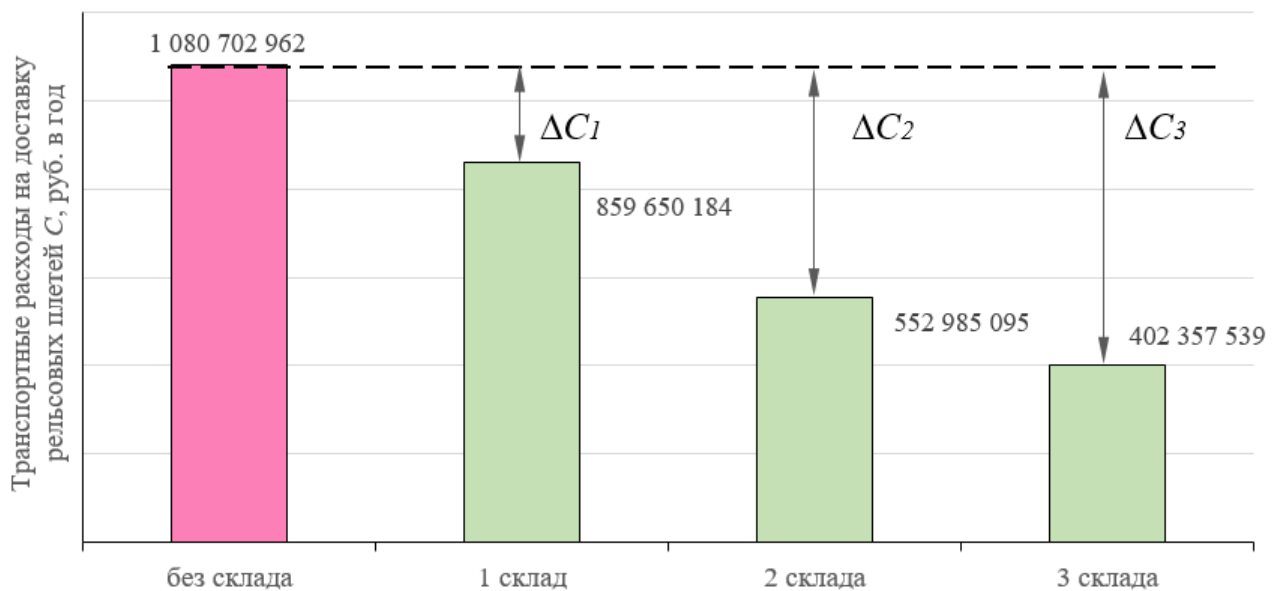


Рис. 9. Сравнительная диаграмма транспортных расходов на доставку рельсовых плетей из РСП-29. $\Delta C_1, \Delta C_2, \Delta C_3$ — сокращение транспортных расходов при одном, двух и трех промежуточных складах, руб. в год

Анализ основных параметров логистического процесса доставки рельсовых плетей по Восточному полигону железных дорог показал:

1. Принятая научная гипотеза о сокращении транспортных расходов на перевозку рельсовых плетей за счет внедрения промежуточных складов подтверждается. Внедрение складов рельсовых плетей для Восточного полигона позволит сократить транспортные расходы на 20% — с 1 080 702 962 руб. до 859 650 184 руб. за год. Также в среднем на 50% уменьшится и суммарный пробег рельсовозных составов.

2. Для решения задачи о выборе мест оптимального расположения промежуточных складов рельсовых плетей может быть применен метод поиска p -медиан графа участков путевых работ.

3. При увеличении количества промежуточных складов в логистической цепи сокращение транспортных расходов может достигать 62%. Например, использование трех промежуточных складов в цепи поставки рельсовых плетей для Восточного полигона снижает транспортные расходы на 678 345 423 руб. в год.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации Федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Список источников

1. Пакулина Е. В., Мигров А. А. Анализ факторов, влияющих на соблюдение плановой продолжительности путевых работ // VI Бетанкуровский международный инженерный форум (Санкт-Петербург, 25 ноября — 2 декабря 2024 года): сборник трудов: в 2 т. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. С. 68–74. EDN IYJIWG
2. Пакулина Е. В., Мигров А. А. Математическая модель определения оптимальной емкости склада рельсовых плетей для путевых работ // Транспорт и логистика: развитие в условиях цифровизации экономики: сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 6–7 февраля 2025 года). Ростов н/Д.: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2025. С. 192–195. EDN GURUCT
3. Адволотикин Д. И. Моделирование складов для хранения материалов верхнего строения железнодорожного пути // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 10(148). DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.133. EDN AVWEFW
4. Филиппова А. С., Поречный С. С., Рамазанова Р. Р. Основы комбинаторных алгоритмов: учебное пособие. Уфа: Изд-во БГПУ, 2018. 131 с.
5. Ху Т. Ч., Шинг М. Т. Комбинаторные алгоритмы / пер. с англ. Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2004. 330 с.
6. Игошин В. И. Теория алгоритмов: учебное пособие. М.: Инфра-М, 2013. 318 с.
7. Мицель А. А. Эвристические методы оптимизации: учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2023. 82 с.

8. Маликов О.Б. Определение запасов и емкости складов в цепях поставок // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. Т. 14, № 1. С. 149–156. EDN YNBXYJ
9. Дыбская В.В. Определение количества и рационального размещения складов в логистической сети // Интегрированная логистика. 2011. № 1. С. 19–22. EDN NDADPP
10. Geoffrion A., Graves G. Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition. 2010. DOI: 10.1007/978-1-4419-6810-4_4
11. Simulation-Optimization Approach for the Multi-Objective Production And Distribution Planning Problem in the Supply Chain Using NSGA-II And Monte Carlo Simulation / N. Nadimkabiri [et al.] // Soft Computing. 2022. DOI: 10.1007/s00500-022-07152-2
12. Шиловский В.Н. Математическая модель оптимизации объемов поставок и распределения запасных частей между территориально разобщенными потребителями // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2003. №4. С. 42–48. EDN ICGQDJ
13. Алексеев В. Е., Захарова Д. В. Теория графов: учебное пособие. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. 119 с.
14. Левитин А. Б. Алгоритмы: введение в разработку и анализ / пер. с англ., ред. С. Г. Тригуб, И. В. Красикова; Университет Вилланова. М.: Вильямс, 2006. 574 с.
15. Кувайскова Ю.Е. Алгоритмы дискретной математики: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 99 с.
16. Тарифное руководство №4 (ред. от 25.01.2016). Кн. 1. Тарифные расстояния между станциями на участках железных дорог (утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества).
17. Об утверждении Порядка расчета тарифов на перевозки грузов железнодорожным транспортом общего пользования и услуги по использованию инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования, выполняемые ОАО «РЖД», а также сборов на дополнительные работы (услуги), связанные с перевозкой грузов железнодорожным транспортом общего пользования, и тарифов на перевозки грузов железнодорожным транспортом общего пользования и услуги по использованию инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования, выполняемые ОАО «РЖД», сборов на дополнительные работы (услуги), связанные с перевозкой грузов железнодорожным транспортом общего пользования (Тарифное руководство № 1): приказ ФАС России от 06.11.2025 № 894/25 (с изм. от 13.02.2026).

Дата поступления: 08.05.2026

Решение о публикации: 29.05.2026

Информация об авторах:

ПАКУЛИНА Елена Вячеславовна — старший преподаватель кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; elena_pakulina29@mail.ru

МИГРОВ Александр Алексеевич — кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; amigrov@gmail.com

ПЕРЕПЕЧЕНОВ Александр Маркович — кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; ddamper@yandex.ru

НОВОСЕЛЬСКИЙ Игорь Юрьевич — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; nttr@pgups.ru

Reduction of Transportation Costs for Delivering of Welded Rail Segments by Intermediate Storages

E. V. Pakulina, A. A. Migrov, A. M. Perepechenov, I. Yu. Novosel'sky

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Pakulina E. V., Migrov A. A., Perepechenov A. M., Novosel'sky I. Yu.* Reduction of Transportation Costs for Delivering of Welded Rail Segments by Intermediate Storages // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 161–175. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-161-175 (In Russian)

Abstract

Rail lashes are an important resource for the construction and repair of the track, the need for which is constantly growing. The rail lashes must be delivered to the work sites in a timely manner. Since work sites or highway construction sites do not have intermediate storage facilities for rail weaves, the logistics chain for providing track work resources often runs with delays that directly affect the timing of work and transportation costs. **Objective:** to reduce transportation costs by introducing intermediate warehouses of rail weaves. **Methods:** methods of graph theory are used. The problem of searching for p-medians on a weighted graph representing a transport network is solved. The Floyd — Warshall algorithm was used to find optimal locations for warehouses. **Results:** the analysis of the logistic supply chain of rail weaves for track work was performed, the main non-deliveries of the existing system were identified and analyzed. A method for optimizing the logistics chain is proposed and justified by introducing rail weaves into the chain of intermediate warehouses. **Practical significance:** the use of intermediate warehouses will reduce transportation costs, reduce the duration of the delivery of lashes to the places of track work and increase the uniformity of loading of rail welding enterprises.

Keywords: logistics, track works, welded rail segments, resource shipping for track works, logistics supply chain of welded rail segments, graph theory, intermediate storage of welded rail segments

References

1. Pakulina E. V., Migrov A. A. Analiz faktorov, vliyayushchikh na soblyudenie planovoj prodolzhitel'nosti putevykh rabot [Analysis of the Factors Influencing Compliance with the Planned Duration of Travel Work], *VI Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sbornik trudov. V 2-kh t. [Betancourt International Engineering Forum, collection of works in 2 volumes]*, Saint Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2024, pp. 68–74. EDN IYJIWG (In Russian)

2. Pakulina E. V., Migrov A. A. Matematicheskaya model' opredeleniya optimal'noj emkosti sklada rel'sovykh pletej dlya putevykh rabot [A Mathematical Model for Determining the Optimal

Storage Capacity of Rail Weaves for Track Work], *Transport i logistika: razvitie v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki: sbornik nauchnykh trudov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii [Transport and Logistics: Development in the Context of the Digitalization of the Economy: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference]*, Rostov-on-Don, Rostov State University of Railway Transport, 2025, pp. 192–195. EDN GURUCT (In Russian)

3. Advolotikin D.I. Modelirovanie skladov dlya khraneniya materialov verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti [Modeling of Warehouses for Storing Materials of the Upper Structure of the Railway Track], *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Scientific Research Journal]*, 2024, no. 10 (148). DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.133. EDN AVWEFW (In Russian)

4. Filippova A.S., Porechnyj S.S., Ramazanova R.R. Osnovy kombinatornykh algoritmov: uchebnoe posobie [Fundamentals of Combinatorial Algorithms: A Textbook], Ufa, Izd-vo BGPU [Bashkir State Pedagogical University Publishing House], 2018, 131 p. (In Russian)

5. Khu T. Ch., Shing M.T. Kombinatornye algoritmy [Combinatorial Algorithms], Nizhnij Novgorod, Izd-vo NNGU im. N. I. Lobachevskogo [Publishing House of N. I. Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University], 2004, 330 p. (In Russian)

6. Igoshin V.I. Teoriya algoritmov: uchebnoe posobie [Theory of Algorithms: A Textbook], Moscow, Infra-M, 2013, 318 p. (In Russian)

7. Mitsel' A.A. Evristicheskie metody optimizatsii: uchebnoe posobie [Heuristic Optimization Methods: A Textbook], Tomsk, TUSUR [Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics], 2023, 82 p. (In Russian)

8. Malikov O.B. Opredelenie zapasov i emkosti skladov v tsepyakh postavok [Determining Stocks and Warehouse Capacity in Supply Chains], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2017, vol. 14, no. 1, pp. 149–156. EDN YNBXYJ (In Russian)

9. Dybskaya V.V. Opredelenie kolichestva i ratsional'nogo razmeshcheniya skladov v logisticheskoy seti [Determination of the Number and Rational Placement of Warehouses in the Logistics Network], *Integrirrovannaya logistika [Integrated Logistics]*, 2011, no. 1, pp. 19–22. EDN NDADPP (In Russian)

10. Geoffrion, Arthur & Graves, Glenn. Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition, 2010. DOI:10.1007/978-1-4419-6810-4_4

11. Nadimkabiri N., et al. Simulation-Optimization Approach for the Multi-Objective Production and Distribution Planning Problem in the Supply Chain Using NSGA-II And Monte Carlo Simulation, *Soft Computing*, 2022. DOI:10.1007/s00500-022-07152-2

12. Shilovskij V.N. Matematicheskaya model' optimizatsii ob'emov postavok i raspredeleniya zapasnykh chastej mezhdru territorial'no razobshchennymi potrebitelyami [Mathematical Model for Optimizing Supply Volumes and Distribution of Spare Parts Between Geographically Separated Consumers], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Forestry Journal]*, 2003, no. 4, pp. 42–48. EDN ICGQDJ (In Russian)

13. Alekseev V.E, Zakharova D.V. Teoriya grafov: Uchebnoe posobie [Graph Theory: A Textbook], Nizhnij Novgorod, Nizhny Novgorod State University, 2017, 119 p. (In Russian)

14. Levitin A. B. Algoritmy: vvedenie v razrabotku i analiz [Algorithms: An Introduction to Development and Analysis], edited by S. G. Trigub, I. V. Krasikova, Villanova University, Moscow, Williams Publishing, 574 p. (In Russian)

15. Kuvajskova Yu. E. Algoritmy diskretnoj matematiki: uchebnoe posobie [Algorithms of Discrete Mathematics: A Textbook], Ulyanovsk State Technical University, 2017, 99 p. (In Russian)

16. Tarifnye rasstoyaniya mezhdru stantsiyami na uchastkakh zheleznnykh dorog [Tariff Distances Between Stations on Railway Sections], Tariff Guide no. 4 (edit. dated January 25, 2016), book 1. (In Russian)

17. Ob utverzhdenii Poryadka rascheta tarifov na perevozki gruzov zheleznodorozhnym transportom obshchego pol'zovaniya i uslugi po ispol'zovaniyu infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol'zovaniya, vypolnyaemye OAO "RZhD" [On Approval of the Procedure for Calculating Tariffs for the Transportation of Goods by Public Railway Transport and Services for the Use of Public Railway Infrastructure Performed by JSC Russian Railways], Order of the Federal Antimonopoly Service of Russia, dated November 06, 2025, no. 894/25.

Received: May 08, 2026

Accepted: May 29, 2026

Author's information:

Elena V. PAKULINA — Senior Lecturer of the Department "Land transport and technological complexes"; elena_pakulina29@mail.ru

Alexander A. MIGROV — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department "Land transport and technological complexes"; amigrov@gmail.com

Alexander A. PEREPECHENOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department "Land transport and technological complexes"; ddamper@yandex.ru

Igor. Yu. NOVOSEL'SKY — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department "Land transport and technological complexes"; nttr@pgups.ru

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 004.021

Алгоритм вычисления минимальных кодовых расстояний CRC как блочного кода

А. А. Блюдов, Г. Ю. Пронин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Блюдов А. А., Пронин Г. Ю. Алгоритм вычисления минимальных кодовых расстояний CRC как блочного кода // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 176–186. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-176-186

Аннотация

Цель: разработать алгоритм, позволяющий определить минимальное кодовое расстояние CRC как блочного кода для различных значений длин информационной части. Разработать способ, позволяющий определить целесообразность применения CRC в качестве блочного помехозащитного кода (в данной статье имеется в виду, что для определенного количества информационных разрядов минимальное кодовое расстояние будет равняться двум). **Методы:** для проведения экспериментальных исследований использовалось компьютерное моделирование с использованием интерпретируемого программного языка общего назначения Python. Для теоретических исследований применены метод аналитического обзора, теория помехозащитного кодирования. **Результаты:** в качестве вспомогательного инструмента описан и применен способ определения верхних границ минимальных кодовых расстояний для кодов CRC. Описан способ определения количества информационных разрядов, при котором применение CRC в качестве помехозащитного кода перестает быть эффективным. Предложен и описан алгоритм расчета минимальных кодовых расстояний CRC как блочного кода для различного количества информационных разрядов. Результатом работы алгоритма являются параметры кодов с различными минимальными расстояниями Хэмминга, для которых отношение минимального кодового расстояния к количеству информационных разрядов является максимально возможным для заданного полинома. Получены параметры блочных кодов для популярных полиномов CRC8. **Практическая значимость:** получен алгоритм, позволяющий определить параметры искомых кодов, образованных полиномами от CRC до CRC32 включительно за разумное время. Это позволяет определить минимальные кодовые расстояния для другого количества информационных разрядов, при условии что минимальное кодовое расстояние больше двух. Приведены результаты применения алгоритма для популярных полиномов CRC8.

Ключевые слова: помехозащитное кодирование, циклический избыточный код, CRC, минимальное кодовое расстояние, разделимые коды

Введение

CRC-коды получили широкое распространение в различных областях техники [1–3]. В современных системах автоматизации, в том числе железнодорожной, для обнаружения ошибок в процессе приема-передачи информации применяются

блочные CRC-коды [4, 5]. Несмотря на их широкое распространение в системах передачи информации, ряд вопросов, связанных с применением CRC, остается нерешенным [6–8]. На данный момент при проектировании системы передачи информации у инженеров есть выбор из множества образующих полиномов, но в общем случае нет ответа на вопрос «Какое минимальное кодовое расстояние даст этот полином, если закодировать n бит?». Современные вычислительные мощности позволяют решить эту задачу путем полного перебора. В случае если длина информационного вектора и образующего полинома невелика, то это не займет много времени. В случае использования CRC16 и CRC32 количество полиномов, пригодных для использования, возрастает, а вместе с ним значительно увеличивается и время выбора полинома. Это приводит к тому, что применяется какой-либо распространенный полином, а защитные свойства кода не исследуются.

В данной статье изучены способы вычисления минимального кодового расстояния в зависимости от количества информационных разрядов для произвольных полиномов.

Под CRC понимается Cyclic Redundancy Code, образуемый по правилу [9]:

$$R(x) = P(x) \cdot x^N \bmod G(x),$$

где $R(x)$ — полином, представляющий значение CRC;

$P(x)$ — полином, представляющий информационный вектор;

$G(x)$ — порождающий полином;

N — степень порождающего полинома.

Дополнительные манипуляции, такие как ненулевое стартовое значение, отражение векторов до и после вычисления, а также сложение результата вычислений с константой, не рассматриваются.

Определение границы эффективности для минимального кодового расстояния 2

Для определения целесообразности применения CRC как блочного кода определим количество информационных битов в коде, при котором минимальное кодовое расстояние [10] $d = 2$. Такое расстояние Хэмминга может быть получено путем применения бита четности/нечетности, что говорит о неэффективности применения CRC.

Так как CRC — это линейный код [9], то любое кодовое слово может быть получено путем линейной комбинации (сложения по модулю 2) двух разрешенных кодовых слов. При этом не существует такой пары разрешенных кодовых слов, что их линейная комбинация не будет входить в код. Таким образом, чтобы двукратная ошибка привела к необнаруживаемому искажению, ее вектор должен совпадать с разрешенным кодовым словом. Поскольку при использовании вышеописанного правила расчета CRC-код будет включать нулевое кодовое слово, то для заданного

полинома нахождение кода с параметрами $(n, k, 2)$ сводится к поиску разрешенного кодового слова, в котором будет две единицы.

Так как CRC представляет собой разделимый код, то существует три возможных распределения единиц между информационной и контрольной частями:

1. Две единицы в кодовой части — невозможно для используемого правила расчета CRC.

2. Одна единица в информационной части; одна единица в контрольной части.

3. Две единицы в информационной части.

Рассмотрим второй случай: одна единица в информационной и одна в контрольной частях. Рассчитаем контрольные векторы от информационных с весом 1. Количество остатков от деления не может превышать 2^{N-1} (для CRC8 это 256), а значит, начнут повторяться. В качестве примера выберем полином $0b100111001$ ($0x139$), так как в его случае первое повторение контрольного вектора начинается после 17-го информационного вектора. Рассчитаем контрольное значение от информационных слов с весом 1 для полинома $0x139$. Результаты расчета приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Контрольные векторы для полинома $0x139$

k	$P(x)$	$R(x)$	$d(R(x), 0)$
1	1	00111001	4
2	10	01110010	4
3	100	11100100	4
4	1000	11110001	4
5	10000	11011011	5
6	100000	10001111	5
7	1000000	00100111	4
8	10000000	01001110	4
9	100000000	10011100	4
10	1000000000	00000001	2
11	10000000000	00000010	2
12	100000000000	00000100	2
13	1000000000000	00001000	2
14	10000000000000	00010000	2
15	100000000000000	00100000	2
16	1000000000000000	01000000	2
17	10000000000000000	10000000	2

В данной таблице рассмотрены 17 кодовых слов, так как при дальнейшем расчете при $P(x) = 10000000000000000$ ($k = 18$), $R(x) = 00111001$. Все дальнейшие

значения контрольной части будут циклически повторяться [9]. Длина этого цикла отличается для полиномов с одинаковым числом бит и не превышает максимальное возможное количество контрольных значений $2^N - 1$. Вычисление следующего значения $R(x)$ в таблице эквивалентно следующей операции:

$$\begin{aligned} &\text{если } \deg(x \cdot R(x)_{t-1}) \neq N, \text{ то } R(x)_t = x \cdot R(x); \\ &\text{если } \deg(x \cdot R(x)_{t-1}) = N, \text{ то } R(x)_t = x \cdot R(x) \oplus P(x). \end{aligned}$$

Данная таблица заканчивается на 00000001, 00000010, 00000100, 00001000, 00010000, 00100000, 01000000, 10000000. Аналогично будут заканчиваться все таблицы [9]. Таким образом, для каждого полинома можно найти параметры кода, при котором минимальное кодовое расстояние равно двум. В данном случае это (18, 10, 2). Из табл. 1 видно, что для того чтобы кодовое расстояние было равно 2, а вес контрольной части равнялся нулю, то $P(x) = 100000000000000001$. Из этого можно сделать вывод, что длина кодового слова, вес информационной и контрольной частей которого равен 1, будет всегда меньше. Значит, этим способом можно определить количество информационных разрядов, при котором минимальное кодовое расстояние будет равно 2, а применение CRC в качестве блочного кода будет нецелесообразным.

Определение параметров граничных кодов для других минимальных кодовых расстояний

Максимальное возможное кодовое расстояние, которое можно получить с помощью образующего полинома, равно количеству единиц в этом полиноме. Это видно, если рассмотреть код, в котором один информационный бит. Для рассматриваемого в качестве примера полинома $0x139$ это будут два кодовых слова 00000000 и 100111001, а параметры кода (9, 1, 5). При увеличении количества информационных разрядов минимальное кодовое расстояние будет уменьшаться. Важно отметить, что в общем случае необязательно существуют коды с минимальными кодовыми расстояниями от N до 2. Перед непосредственным поиском кодовых алфавитов определим граничные параметры. Для этого в табл. 2 посчитаем количество единиц в кодовых словах для полинома $0b111010111$ ($0x1D7$), так как этот пример нагляднее предыдущего.

ТАБЛИЦА 2. Контрольные векторы для полинома $0x1D7$

k	$R(x)$	$d(R(x), 0)$
1	11010111	7
2	01111001	6
3	11110010	6

Окончание табл. 2

k	$R(x)$	$d(R(x), 0)$
4	00110011	5
5	01100110	5
6	11001100	5
7	01001111	6
8	10011110	6
9	11101011	7
10	00000001	2
11	00000010	2
12	00000100	2
13	00001000	2
14	00010000	2
15	00100000	2
16	01000000	2
17	10000000	2

Так как в табл. 1 и 2 фактически приведены контрольные части кодовых слов от информационных векторов весом 1, то можно сделать вывод, что минимальное кодовое расстояние в коде с количеством информационных разрядов весом k не может превышать сумму весов соответствующего контрольного и информационного векторов. На основании данных, приведенных в табл. 2, определим максимально возможное количество информационных разрядов в кодовых алфавитах, образованных полиномом $0x1D7$, для минимальных кодовых расстояний (2, 7). Для этого запишем минимальное количество информационных разрядов для соответствующих кодовых расстояний. В случае если кодовое расстояние отсутствует, ему присваивается значение, соответствующее следующему минимальному кодовому расстоянию.

ТАБЛИЦА 3. Верхние границы информационных разрядов для минимальных кодовых расстояний блочного CRC $0x1D7$

d	$k_{\max}(d)$
7	1
6	2
5	4
4	10
3	10
2	10

Алгоритм поиска кодовых слов с минимальным кодовым расстоянием

При поиске кодовых слов с минимальным кодовым расстоянием будем исходить из следующих предпосылок:

1. Всех минимальных кодовых расстояний в отрезке $(2, N)$ может не существовать.
2. В случае если вес информационного вектора больше, чем минимальное кодовое расстояние, то проверка бессмысленна.

Алгоритм поиска кодовых слов с минимальным кодовым расстоянием (см. рисунок):

1. Выбирается и фиксируется проверяемый полином $G(x)$.
2. По формуле $R(x) = P(x) \cdot x^N \bmod G(x)$ рассчитывается первый контрольный полином от информационного полинома $P(x) = 1$.
3. Выбирается следующий информационный полином $P(x)_{t+1} = x \cdot P(x)_t$.
4. От него рассчитывается следующий контрольный полином.

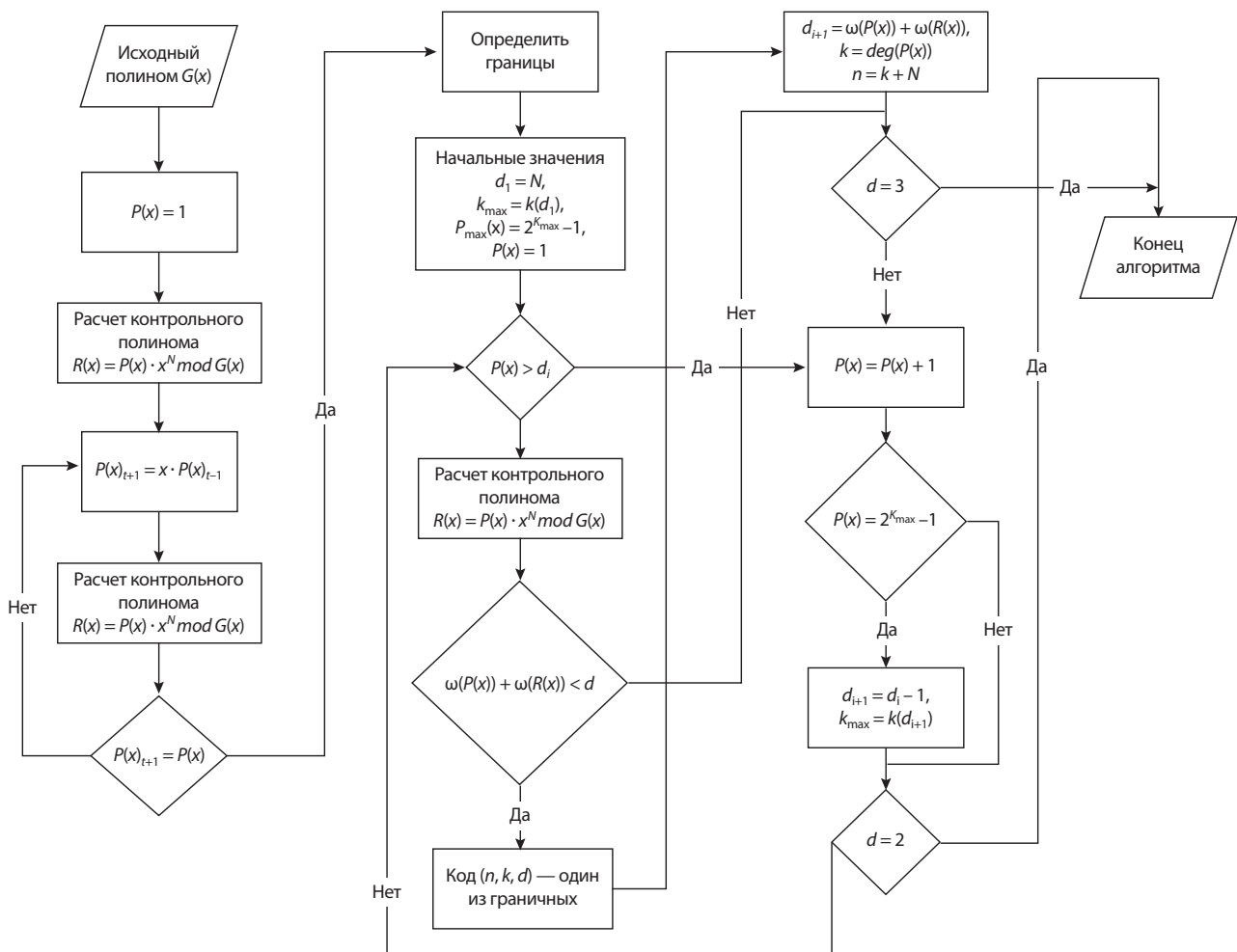


Рисунок. Алгоритм поиска кодовых слов с минимальным кодовым расстоянием

5. Пункты 3 и 4 повторяются до тех пор, пока значение контрольного полинома не совпадет с первым полиномом.

6. Определить границы. Для минимальных кодовых расстояний от N до 2 определяются максимальное возможное количество информационных разрядов.

7. Определить начальные значения $d_1 = N$, $k_{\max} = k(d_1)$, $P_{\max}(x) = 2^{k_{\max}} - 1$, $P(x) = 1$.

8. Если вес информационного полинома больше искомого, перейти к пункту 12.

9. Рассчитать контрольный полином.

10. Если $\omega(P(x) + \omega(R(x))) < d$, то $d_{i+1} = \omega(P(x)) + \omega(R(x))$, $k = \deg(P(x))$, $n = k + N$, то запомнить код с параметрами (n, k, d) .

11. Если $d = 3$, то перейти к пункту 16.

12. Увеличить $P(x)$ на единицу.

13. Если $P(x) = 2^{k_{\max}} - 1$, то $d_{i+1} = d_i - 1$, $k_{\max} = k(d_{i+1})$.

14. Если $d = 2$, то перейти к пункту 16.

15. Перейти к пункту 8.

16. Конец алгоритма.

Далее приводятся результаты использования алгоритма (табл. 4). Для облегчения восприятия для каждого полинома приведен код с $k = 1$.

ТАБЛИЦА 4. Таблица зависимости минимального кодового расстояния от длины

Полином в двоичном виде	Полином в шестнадцатерич- ном виде	Граничные коды n, k, d
100011011	1B	(9, 1, 5) (30, 22, 4) (52, 44, 2)
100011101	1D	(9, 1, 5) (15, 7, 4) (26, 18, 3) (256, 248, 2)
100101011	2B	(9, 1, 5) (21, 13, 4) (68, 60, 3) (256, 248, 2)
100101101	2D	(9, 1, 5) (12, 8, 4) (39, 31, 3) (256, 248, 2)
100111111	3F	(9, 1, 7) (12, 8, 6) (13, 5, 5) (18, 10, 4) (28, 20, 3) (86, 78, 2)
101001101	4D	(9, 1, 5) (24, 16, 3) (256, 248, 2)
101011111	5F	(9, 1, 7) (11, 8, 4) (49, 41, 3) (256, 248, 2)
101100011	63	(9, 1, 5) (13, 5, 4) (24, 16, 3) (256, 248, 2)
101100101	65	(9, 1, 5) (31, 23, 4) (41, 33, 3) (256, 248, 2)
101101001	69	(9, 1, 5) (17, 8, 3) (256, 248, 2)
101110001	71	(9, 1, 5) (16, 8, 4) (36, 28, 3) (256, 248, 2)
101110111	77	(9, 1, 7) (11, 3, 6) (12, 4, 3) (86, 78, 2)
101111011	7B	(9, 1, 7) (11, 3, 6) (12, 4, 5) (17, 8, 3) (86, 78, 2)

Окончание табл. 4

Полином в двоичном виде	Полином в шестнадцатерич- ном виде	Граничные коды <i>n, k, d</i>
110000111	87	(9, 1, 5) (10, 8, 4) (88, 80, 3) (256, 248, 2)
110001011	8B	(9, 1, 5) (22, 14, 4) (86, 78, 2)
110001101	8D	(9, 1, 5) (22, 14, 4) (60, 52, 3) (256, 248, 2)
110011111	9F	(9, 1, 7) (10, 2, 4) (52, 44, 2)
110100011	A3	(9, 1, 5) (13, 5, 4) (86, 78, 2)
110101001	A9	(9, 1, 5) (14, 6, 3) (256, 248, 2)
110110001	B1	(9, 1, 5) (15, 7, 4) (52, 44, 2)
110111101	BD	(9, 1, 7) (10, 2, 6) (11, 3, 5) (14, 6, 4) (26, 18, 3) (86, 78, 2)
111000011	C3	(9, 1, 5) (10, 2, 4) (54, 46, 3) (256, 248, 2)
111001111	CF	(9, 1, 7) (10, 2, 4) (28, 20, 3) (256, 248, 2)
111010111	D7	(9, 1, 7) (10, 2, 6) (12, 4, 5) (18, 10, 2)
111011101	DD	(9, 1, 7) (10, 2, 6) (12, 4, 3) (86, 78, 2)
111100111	E7	(9, 1, 7) (10, 2, 4) (116, 108, 3) (256, 248, 2)
111110011	F3	(9, 1, 7) (10, 2, 4) (52, 44, 2)
111110101	F5	(9, 1, 7) (10, 2, 6) (14, 6, 3) (256, 248, 2)
111111001	F9	(9, 1, 7) (10, 2, 4) (29, 21, 3) (86, 78, 2)

Заключение

В статье описан и предложен алгоритм вычисления минимальных кодовых расстояний CRC как блочного кода. Он определяет параметры кодов с минимальным отношением информационных разрядов к минимальному кодовому расстоянию для заданного полинома. Описанный в статье процесс вычисления параметров кодов применим только к классическому методу вычисления CRC. В случае если в процессе расчета применяются какие-либо модификации (например, ненулевое стартовое значение, отражение векторов до и после вычисления, а также сложение результата вычислений с константой), то результаты применения алгоритма могут быть недостоверны. В случае если анализируется классический метод расчета, то в качестве объекта исследования может быть использован любой полином вне зависимости от его длины и простоты.

Количество вычислений, применяемое в процессе поиска параметров кодов для полиномов, использующихся на практике, делает его применение без ЭВМ неэффективным. Для ускорения вычислений выполняется предварительная подготовка, которая определяет верхнюю границу количества информационных разрядов для кодовых расстояний от количества единиц в образующем полиноме до $d = 3$, а также точные параметры кода $(n, k, 2)$, при которых отношение k / d

является максимально возможным. Также большая эффективность данного алгоритма по сравнению с непосредственным вычислением параметров кодов путем их перебора достигается за счет учета факта линейности CRC.

В статье приведены результаты применения алгоритма для 29 полиномов, которые могут использоваться в качестве образующих в CRC8. Данный алгоритм может быть применен для оценки эффективности полиномов, в случае если CRC используется как блочный код в информационных сетях, что позволит выбрать максимально эффективный из них в зависимости от количества информационных разрядов, используемых для передачи данных.

Список источников

1. Гуртова К.С. Метод защиты информации цифровых документов с помощью невидимых цифровых меток и его реализация // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. № 1.
2. Потапова К.А. Идентификация данных с помощью RFID-меток // Вестник науки. 2023. № 10(67).
3. Андреев Р.А., Попова Т.С., Федоров А.С. Методика проведения сигнального тестирования устройств с поддержкой «ЭРА-ГЛОНАСС» // International Journal of Professional Science, 2022. № 5.
4. Прохорова Г.М. Оборудование станции устройствами микропроцессорной централизации ЭЦ-ЕМ с увязкой с системой диагностирования и мониторинга (АДК-СЦБ) // Форум молодых ученых. 2017. № 6(10).
5. Калинин Т.С. Спектрально-сигнатурная диагностика микропроцессорных информационно-управляющих систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Инженерный вестник Дона. 2012. № 1.
6. Семеренко В.П. Теория и практика CRC-кодов: новые результаты на основе автоматных моделей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 9 (76).
7. Nuriddinov Q., Azizov A., Abdullaev R. Method of Optimization and Protection of Diagnostic Data in Monitoring Railway Automation Devices // Universum: Technical sciences. 2023. No. 5–7 (110).
8. Абдуллаев Р.Б. Определение числа необнаруживаемых ошибок циклическими кодами // Universum: технические науки. 2025. № 10(139).
9. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки / пер. с англ.; под ред. Р.Л. Добрушина, С.И. Самойленко. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Мир, 1976.
10. Hamming R. W. Error Detecting and Error Correcting Codes // The Bell System Technical Journal. 1950. No. 2, vol. 29. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x

Дата поступления: 05.04.2026

Решение о публикации: 24.05.2026

Контактная информация:

БЛЮДОВ Антон Александрович — кандидат техн. наук, доцент; bludov@pgups.ru

ПРОНИН Георгий Юрьевич — аспирант; georgiy3pronin@yandex.ru

Algorithm for Computing Minimum Code Distances of CRC as a Block Code

A. A. Blyudov, G. Yu. Pronin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Blyudov A. A., Pronin G. Yu. Algorithm for Computing Minimum Code Distances of CRC as a Block Code // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 176–186. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-176-186 (In Russian)

Abstract

Objective: to develop an algorithm for determining the minimum code distance of a CRC as a block code for various data part lengths. To develop a method for determining the feasibility of using CRC as a block noise-protection code (in this article, it is implied that for a certain number of data bits, the minimum code distance will be equal to two). **Methods:** computer simulation using the general-purpose interpreted programming language Python was used for experimental studies. The analytical review method and the theory of noise-protection coding were applied for theoretical studies. **Results:** a method for determining the upper bounds of minimum code distances for CRC codes is described and applied as an auxiliary tool. A method for determining the number of data bits at which the use of CRC as a noise-protection code ceases to be effective is described. An algorithm for calculating the minimum code distances of a CRC as a block code for various numbers of data bits is proposed and described. The algorithm yields parameters for codes with different minimum Hamming distances, for which the ratio of the minimum code distance to the number of data bits is the maximum possible for a given polynomial. Parameters for block codes for popular CRC8 polynomials are obtained. **Practical significance:** an algorithm has been developed that allows one to determine the parameters of sought-after codes formed by CRC polynomials up to and including CRC32 in a reasonable time. This allows one to determine minimum code distances for a different number of data bits, provided that the minimum code distance is greater than two. Results from applying the algorithm to popular CRC8 polynomials are presented.

Keywords: error-correcting coding, cyclic redundancy code, CRC; minimum code distance, separable codes

References

1. Gurtova K.S. Metod zashchity informatsii tsifrovyykh dokumentov s pomoshch'yu nevidimyykh tsifrovyykh metok i ego realizatsiya [Method for Protecting Information of Digital Documents Using Invisible Digital Watermarks and Its Implementation], *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie [Modern Information Technologies and IT Education]*, 2022, no. 1. (In Russian)
2. Potapova K.A. Identifikatsiya dannykh s pomoshch'yu RFID-metok [Data Identification Using RFID Tags], *Vestnik nauki [Bulletin of Science]*, 2023, no. 10 (67). (In Russian)

3. Andreev R.A., Popova T.S., Fedorov A.S. Metodika provedeniya signal'nogo testirovaniya ustrojstv s podderzhkoj "ERA-GLONASS" [Methodology for Signal Testing of Devices Supporting ERA-GLONASS], *International Journal of Professional Science*, 2022, no. 5. (In Russian)
4. Prokhorova G.M. Oborudovanie stantsii ustrojstvami mikroprotsessornoj tsentralizatsii ETs-EM s uvyazkoj s sistemoj diagnostirovaniya i monitoringa (ADK-STSB) [Equipping a Station with Microprocessor Centralization Devices ETs-EM with Coordination with the Diagnostic and Monitoring System (ADC-SCB)], *Forum molodykh uchenykh [Forum of Young Scientists]*, 2017, no. 6 (10). (In Russian)
5. Kalinin T.S. Spektral'no-signaturnaya diagnostika mikroprotsessornykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [Spectral-Signature Diagnostics of Microprocessor Information and Control Systems for Railway Automation and Telemechanics], *Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, 2012, no. 1. (In Russian)
6. Semerenko V.P. Teoriya i praktika CRC-kodov: novye rezul'taty na osnove avtomatnykh modelej [Theory and Practice of CRC Codes: New Results Based on Automaton Models], *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]*, 2015, no. 9 (76). (In Russian)
7. Nuriddinov Q., Azizov A., Abdullaev R. Method of Optimization and Protection of Diagnostic Data in Monitoring Railway Automation Devices, *Universum: Technical Sciences*, 2023, no. 5–7 (110).
8. Abdullaev R.B. Opredelenie chisla neobnaruzhivaemykh oshibok tsiklicheskim kodami [Determination of the Number of Undetected Errors by Cyclic Codes], *Universum: Technical Sciences*, 2025, no. 10 (139). (In Russian)
9. Peterson W., Weldon E. Error-Correcting Codes; translated from English; edited by R.L. Dobrushin, S.I. Samoilenko, 2nd ed., revised and enlarged. M.: Mir, 1976, 594 p. (In Russian)
10. Hamming R.W. Error Detecting and Error Correcting Codes, *The Bell System Technical Journal*, 1950, vol. 29, no. 2, pp. 147–160. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x

Received: April 05, 2026

Accepted: May 24, 2026

Author's information:

Anton A. BLYUDOV — PhD in Engineering, Associate Professor; bludov@pgups.ru

Georgiy Yu. PRONIN — Postgraduate Student; georgiy3pronin@yandex.ru

УДК 621.317

Система автоматического управления энергопотреблением подогреваемого тротуара на основе резистивного кабеля

Б. А. Соловьев, Г. К. Гамисония, А. Д. Аюпов, Р. Т. Хазиева

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1

Для цитирования: Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Аюпов А. Д., Хазиева Р. Т. Система автоматического управления энергопотреблением подогреваемого тротуара на основе резистивного кабеля // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 187–205. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-187-205

Аннотация

Цель: разработка подхода к автоматическому управлению энергопотреблением электрических систем подогрева тротуаров на основе резистивного греющего кабеля, обеспечивающего минимизацию расхода электроэнергии при сохранении требуемого уровня противогололедной защиты. **Методы:** выполнены обзор и классификация существующих принципов управления системами снеготаяния: от простейших термостатов по температуре воздуха до комбинированных систем с датчиками температуры поверхности, влажности и погодозависимыми алгоритмами. Для сравнительного анализа эффективности различных стратегий управления использована упрощенная теплотехническая модель подогреваемой плиты, реализованная методом численного интегрирования (метод Эйлера) с шагом дискретизации 5 мин. Оценка энергопотребления выполнена на основе уравнения теплового баланса, учитывающего подводимую мощность, теплопотери и затраты на фазовый переход. **Результаты:** предложена структурная схема системы автоматического управления, включающая силовую часть, измерительные компоненты (датчики температуры воздуха, поверхности и влажности) и микропроцессорный контроллер с возможностью реализации логических и ПИД-алгоритмов. На основе имитационного моделирования суточной работы системы установлено, что переход от простейшего управления по температуре воздуха к управлению по температуре поверхности позволяет сократить энергопотребление на 35 %, а применение комбинированного алгоритма с учетом наличия влаги/осадков — на 60 % (с 2,5 до 1,0 кВт·ч/м²). Показано, что интеграция прогнозных данных и зональное ограничение мощности создают дополнительный потенциал энергосбережения. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих систем электрического подогрева тротуаров, входных групп, пандусов и других объектов городской инфраструктуры. Предложенные алгоритмы и архитектура системы позволяют обоснованно выбирать стратегию управления, обеспечивающую значительное снижение эксплуатационных затрат на электроэнергию без ухудшения условий безопасности пешеходов.

Ключевые слова: подогрев тротуара, резистивный кабель, энергопотребление, снеготаяние, датчик влажности, температурный датчик

Введение

В условиях климатических зон с устойчивыми отрицательными температурами в зимний период обеспечение безопасных условий передвижения пешеходов по тротуарам и пандусам является важной инженерной задачей. Обледенение и уплотненный снег приводят к увеличению травматизма, повышенным затратам на механическую уборку и применение реагентов, а также к ускоренному разрушению покрытий. Одним из эффективных способов решения проблемы является

использование систем электрического подогрева тротуаров на основе резистивных кабелей или нагревательных матов.

Практика эксплуатации показывает, что при неправильном выборе стратегии управления такие системы могут обладать крайне высоким энергопотреблением, сопоставимым с нагрузкой системы электроснабжения здания. В то же время коммерческие решения для подогрева подъездных путей и тротуаров, позиционируемые как энергоэффективные, практически всегда используют автоматическое управление, основанное на датчиках температуры и наличия влаги/осадков, а также на достаточно гибких алгоритмах включения и задержки отключения [1, 2].

Целями настоящего исследования являются анализ существующих принципов автоматического управления электрическими системами подогрева тротуаров и разработка структурной схемы системы управления энергопотреблением подогреваемого тротуара на основе резистивного греющего кабеля, обеспечивающей требуемый уровень противогололедной защиты при минимальном расходе электроэнергии.

Научная значимость исследования заключается в формализации и сравнительном анализе различных алгоритмов управления системами снеготаяния на основе упрощенной теплотехнической модели подогреваемого тротуара, а также в количественной оценке энергетического эффекта от применения комбинированных и прогнозных алгоритмов управления.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных результатов при проектировании и модернизации систем электрического подогрева тротуаров и пешеходных зон, а также при выборе алгоритмов автоматического управления, позволяющих существенно снизить энергопотребление без ухудшения условий безопасности движения. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- выполнить обзор конструктивных особенностей систем подогрева тротуара на основе резистивного кабеля и установить характерные диапазоны удельной мощности;
- классифицировать применяемые в практике способы управления мощностью систем снеготаяния;
- сформировать упрощенную математическую модель теплового режима подогреваемого тротуара;
- предложить алгоритм автоматического управления, ориентированный на снижение энергопотребления;
- оценить ожидаемую экономию энергии при переходе от простейших систем управления к комбинированным.

Анализ публикаций по теме показывает, что термоэлектрические генераторы (ТЭГ), работающие на основе эффекта Зеебека, на протяжении последних десятилетий активно исследуются как средство прямого преобразования тепловой

энергии в электрическую. Основное внимание в научных работах уделяется утилизации сбросового тепла промышленных установок, транспортных систем и объектов инфраструктуры, где тепловая энергия в противном случае теряется без полезного использования [3, 4]. В ряде обзорных работ показано, что ключевыми преимуществами термоэлектрических систем являются отсутствие движущихся частей, высокая надежность и возможность длительной автономной эксплуатации, тогда как главным ограничением остается низкий коэффициент полезного действия по сравнению с традиционными тепловыми машинами.

Существенный массив исследований посвящен материалам термоэлектрических элементов и влиянию их свойств на эффективность генерации. Как основной критерий качества используется безразмерный параметр добротности ZT , определяемый соотношением между коэффициентом Зеебека, электрической проводимостью и теплопроводностью материала. Для коммерчески доступных модулей на основе теллурида висмута Bi_2Te_3 , работающих вблизи комнатных температур, характерны значения $ZT \approx 0,8-1,1$, что ограничивает достижимый КПД несколькими процентами. В работах последних лет активно рассматриваются новые классы материалов (скуттерудиты, Half-Heusler-соединения, SnSe , наноструктурированные композиции), для которых сообщается о достижении $ZT > 2$ в лабораторных условиях, однако их промышленное применение пока сдерживается высокой стоимостью, технологической сложностью и проблемами долговременной стабильности.

Отдельное направление исследований связано с инженерными аспектами построения термоэлектрических генераторов и оптимизацией режимов их работы. Показано, что выходная электрическая мощность ТЭГ в значительной степени определяется не только свойствами материала, но и величиной температурного градиента, условиями теплообмена на горячей и холодной сторонах, а также согласованием электрической нагрузки с внутренним сопротивлением генератора [5–7]. В ряде работ подчеркивается, что при недостаточном охлаждении холодной стороны эффективность генерации резко падает даже при наличии источника тепла с достаточно высокой температурой. В связи с этим большое внимание уделяется разработке теплообменников, радиаторов, тепловых труб и других средств интенсификации теплоотвода.

Значительное число публикаций посвящено применению ТЭГ в транспортных системах, прежде всего для рекуперации тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания. Экспериментальные и опытно-промышленные образцы таких систем демонстрируют возможность генерации десятков и сотен ватт электроэнергии, однако при этом доля возвращаемой энергии по отношению к тепловому потоку остается относительно небольшой. Аналогичные подходы рассматриваются для стационарных промышленных источников тепла — печей, котлов, теплообменников и трубопроводов, где термоэлектрические модули

интегрируются в существующие конструкции без существенного вмешательства в технологический процесс.

В последние годы возрастает интерес к использованию термоэлектрических генераторов в системах распределенной и вторичной энергетики, а также в концепции энергосбора (energy harvesting) для питания маломощных электронных устройств и датчиков интернета вещей. В научных работах показано, что даже при малых температурных перепадах (5–30 °С) ТЭГ способны обеспечивать энергией автономные сенсорные узлы, микроконтроллеры и системы беспроводной передачи данных при условии крайне низкого энергопотребления нагрузки. Особенно перспективными считаются приложения в интеллектуальной инфраструктуре — зданиях, инженерных сетях и городских объектах, где температурные градиенты присутствуют постоянно, но традиционно не используются для генерации энергии.

При этом анализ литературы показывает, что большинство исследований либо сосредоточено на высокотемпературных источниках тепла, либо ограничивается теоретическими оценками и модельными экспериментами. Работы, посвященные экспериментальной оценке выходной мощности коммерческих модулей Пельтье в условиях низкопотенциального тепла, встречаются значительно реже и часто не содержат детального сопоставления теоретических и экспериментальных результатов. Кроме того, недостаточно освещены вопросы практической реализуемости таких систем в элементах городской инфраструктуры, где важную роль играют надежность, простота конструкции и возможность интеграции без значительного удорожания объекта.

Материалы и методы

Конструкция и принцип действия

Электрические системы подогрева тротуаров относятся к поверхностным системам противогололедной защиты. Основным элементом является резистивный греющий кабель (постоянной или саморегулирующейся мощности), укладываемый в тело конструкции — бетонную плиту, слой асфальтобетона или песчано-цементную подушку под тротуарной плиткой. Сверху формируется рабочее покрытие (бетон, асфальт, плитка), обеспечивающее механическую прочность и защиту кабеля. Характерный диапазон удельной установленной мощности для противогололедных систем составляет 200–400 Вт/м² в умеренном климате и может достигать 300–500 Вт/м² в более суровых условиях. При пониженных наружных температурах (ниже –15 °С) и интенсивных снегопадах целесообразно проектировать системы с удельной мощностью не менее 250–300 Вт/м². Поверхностная температура тротуара T_s определяется балансом между тепловой мощностью, выделяемой кабелем, теплопотерями в окружающую среду и затратами тепла на плавление снега и льда [8–9]. Энергия, подведенная к кабелю, в конечном счете расходуется:

- на нагрев конструкций (бетонной плиты, основания);
- теплопередачу в окружающий воздух (конвекция, излучение);
- фазовый переход льда в воду.

Таким образом, эффективное управление энергопотреблением требует учета как внешних климатических условий, так и тепловых характеристик конструкции.

Режимы работы и критерии эффективности

С точки зрения пользователя основными критериями эффективности системы подогрева являются:

- отсутствие льда и опасного снежного наката на поверхности тротуара;
- минимальное энергопотребление при обеспечении заданного уровня безопасности;
- высокая автоматизация работы (минимум ручных вмешательств).

Надежность работы системы определяется тем, насколько устойчиво обеспечивается выполнение целевого условия: $T_s \geq T_{\min}$ (обычно $T_{\min} \approx 1-3$ °С) при наличии осадков в виде снега и/или при оттепелях, когда возможно образование гололеда. Периоды, когда поверхность сухая и температура воздуха выше нуля, должны сопровождаться полным отключением системы для снижения затрат электроэнергии.

Способы управления системами подогрева тротуаров

Ручное и простейшее термостатное управление

Исторически первые системы подогрева тротуаров функционировали по принципу ручного включения: пользователь просто включал цепь питания кабеля при наступлении морозов и выключал ее при улучшении погоды. Подобная схема проста, но крайне неэффективна — система нередко работает «на всякий случай» даже при отсутствии осадков. Следующим шагом развития стало применение простых термостатов, реагирующих только на температуру наружного воздуха T_a . Управляющий закон в этом случае можно описать двухпозиционной логикой:

если $T_a \leq T_{\text{он}}$, то $u = 1$;

если $T_a \geq T_{\text{оф}}$, то $u = 0$,

где u — управляющее воздействие (0 — выключено, 1 — включено);

$T_{\text{он}}$ и $T_{\text{оф}}$ — пороги включения и отключения соответственно.

Несмотря на определенное улучшение энергетической эффективности по сравнению с полностью ручным управлением, подобные системы имеют существенный недостаток: они не учитывают наличие или отсутствие осадков и состояние поверхности. При отрицательной температуре воздуха, но сухой поверхности подогрев остается включенным, что приводит к излишнему расходу энергии [10–12].

Управление по температуре поверхности

Для более точного поддержания теплового режима в практике широко применяются датчики температуры поверхности или датчики, размещенные в толще плиты на определенной глубине. Контроллер, ориентируясь на температуру T_s , стремится удерживать ее в заданном диапазоне:

$$T_{\min} \leq T_s \leq T_{\max}.$$

Двухпозиционный закон управления можно записать в виде:

если $T_s \leq T_{\min}$, то $u = 1$;

если $T_s \geq T_{\max}$, то $u = 0$.

При этом датчик воздуха T_a чаще используется как ограничитель (например, блокировка системы при температурах выше $+3...+5$ °С). Подобная схема управления более энергоэффективна, так как учитывает тепловую инерцию конструкции и предотвращает перегрев поверхности, однако по-прежнему не различает сухую и влажную поверхность.

Комбинированное управление по температуре и наличию влаги

Наиболее распространенным решением для систем снеготаяния стало применение комбинированных датчиков, измеряющих одновременно температуру и наличие влаги/осадков (снега, воды) на поверхности. Такие датчики устанавливаются заподлицо с покрытием и позволяют отличать сухую и влажную поверхность при отрицательной температуре.

Управляющий алгоритм в этом случае может быть представлен в виде:

если $(T_a \leq T_{\text{crit}} \text{ И } M = 1)$ ИЛИ $(T_s \leq T_{\min})$, то $u = 1$;

если $(M = 0 \text{ И } T_s \geq T_{\max})$, то $u = 0$,

где M — бинарный сигнал датчика влаги (1 — на поверхности есть влага/снег, 0 — поверхность сухая);

T_{crit} — критическая температура воздуха, при которой возможно образование наледи (обычно $0...+2$ °С).

Такой подход обеспечивает включение системы только при сочетании неблагоприятных факторов: отрицательная (или около нулевой) температура и присутствие влаги/осадков [13]. Согласно данным производителей, применение датчиков льда и влаги позволяет снизить энергопотребление до 80% по сравнению с простым управлением по температуре воздуха.

Погодозависимое и прогнозное управление

Дополнительным шагом в сторону повышения энергоэффективности является интеграция системы подогрева тротуаров в общую систему автоматизации здания с использованием погодозависимых алгоритмов. В этом случае контроллер учитывает:

- текущие показания датчиков T_a , T_s и M ;
- краткосрочный прогноз температуры и осадков;
- ограничения по максимальной разрешенной мощности P_{lim} в пиковые часы.

На основе этой информации возможно заранее включать систему (режим преднагрева) перед ожидаемым снегопадом, а также ограничивать мощность при отсутствии необходимости в максимальной интенсивности снеготаяния. Подобные подходы описаны в европейских стандартах, регламентирующих управление электрическими системами отопления и поверхностного подогрева.

Продвинутое алгоритмы: ПИД и нечеткое управление

Для еще более точного соблюдения требуемого температурного режима поверхности могут применяться пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) и нечеткие регуляторы, формирующие непрерывное управляющее воздействие $u(t)$ в виде коэффициента заполнения (скважности) ШИМ-сигнала на контакторе или полупроводниковом реле.

Обобщенно ПИД-закон можно записать в виде:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $e(t) = T_{\text{set}} - T \cdot s(t)$ — ошибка регулирования;

T_{set} — заданная температура поверхности;

K_p , K_i , K_d — коэффициенты ПИД-регулятора.

В системах подогрева тротуаров ПИД-регулятор чаще используется в качестве «надстройки» над двухпозиционной логикой и ограничен диапазоном $0 \leq u(t) \leq 1$, что позволяет реализовывать регулирование мощности путем изменения доли времени включения нагрева в каждом интервале дискретизации. Нечеткие регуляторы строятся на базе набора правил вида «если температура низкая и идет снег, то увеличить мощность», что хорошо согласуется с интуитивной логикой эксплуатации, однако требует предварительной настройки и валидации.

Математическая модель теплового режима подогреваемого тротуара

Упрощенная тепловая схема

Для анализа энергопотребления введем упрощенную модель теплового баланса в одномерной постановке. Будем рассматривать характерный участок тротуара площадью A , содержащий греющий кабель с установленной электрической мощностью P_{el} при включенном состоянии ($u = 1$).

Баланс тепла для слоя толщиной h , характеризуемого эффективной теплоемкостью C_{th} (на единицу площади), можно записать в виде:

$$C_{th} \cdot \frac{dT_s}{dt} = q_h - q_{\text{loss}} - q_{\text{melt}}, \quad (2)$$

где T_s — температура поверхности;

q_h — удельная тепловая мощность, подводимая нагревателем (Вт/м²);

q_{loss} — удельные теплотери в окружающую среду (Вт/м²);

q_{melt} — удельная мощность, расходуемая на плавление снега/льда (Вт/м²).

При включенной системе:

$$q_h = \left(\frac{P_{\text{el}}}{A} \right) u. \quad (3)$$

Теплотери можно приближенно представить как линейную функцию перепада температур между поверхностью и наружным воздухом:

$$q_{\text{loss}} = U \cdot (T_s - T_a), \quad (4)$$

где U — суммарный коэффициент теплопередачи (Вт/(м²·К)), учитывающий конвекцию, излучение и теплопроводность вглубь конструкции.

Мощность на плавление снега задается соотношением:

$$q_{\text{melt}} = \frac{\rho_s \cdot L_f \cdot \Delta h_s}{\Delta t}, \quad (5)$$

где ρ_s — плотность снега (кг/м³);

L_f — удельная теплота плавления льда (Дж/кг);

Δh_s — уменьшение толщины снежного слоя за интервал Δt .

Удельное энергопотребление и время работы

Интегрируя уравнение баланса по времени, можно получить выражение для суммарной энергии, подведенной к системе за эпизод снеготаяния:

$$E_{\text{el}} = \int P_{\text{el}} \cdot u(t) dt. \quad (6)$$

В случае простейшей оценки при постоянной удельной мощности q_h и времени суммарного включения τ_{on} справедлива зависимость:

$$E_{\text{el}} = q_h \cdot A \cdot \tau_{\text{on}}. \quad (7)$$

Тогда удельное энергопотребление на единицу площади за эпизод снеготаяния:

$$e_{\text{sp}} = \frac{E_{\text{el}}}{A} = q_h \cdot \tau_{\text{on}}. \quad (8)$$

Основной резерв экономии энергии связан с сокращением τ_{on} без ухудшения качества снеготаяния. Это достигается за счет более точного определения моментов включения и отключения, использования тепловой инерции конструкции и предотвращения работы «вхолостую» при отсутствии осадков.

Структура системы автоматического управления энергопотреблением

Общая архитектура

На основе проведенного анализа предлагается следующая структурная схема системы автоматического управления подогреваемым тротуаром:

- силовая часть: греющий кабель (или несколько кабельных контуров), силовые контакторы или твердотельные реле;
- измерительная часть: датчик температуры поверхности T_s , датчик наружной температуры T_a , датчик влажности/осадков M , (опционально) датчик температуры в толще конструкции;
- контроллер: микропроцессорный блок с возможностью реализации логических и ПИД-алгоритмов, связи с системой диспетчеризации;
- исполнительные устройства: силовые ключи, сигнальные индикаторы, устройства защиты.

Предлагаемый алгоритм управления

Алгоритм работы можно описать следующей последовательностью:

1. Непрерывное измерение T_a , T_s и M .
2. Оценка климатических условий:
 - если $T_a > T_{\text{block}}$ (например, $+5$ °C), система блокируется ($u = 0$);
 - если $T_a \leq T_{\text{block}}$, разрешается работа по алгоритму снеготаяния.
3. Условие включения (режим активного снеготаяния):
если $(T_a \leq T_{\text{crit}} \text{ И } M = 1)$ ИЛИ $(T_s \leq T_{\text{min}})$, то система переходит в активный режим ($u \rightarrow u_{\text{max}}$).
4. Регулирование мощности в активном режиме:
 - по мере приближения T_s к T_{set} ($2-3$ °C) управляющее воздействие u уменьшается согласно закону ПИД-регулятора, реализуемого через ШИМ;
 - при $T_s \geq T_{\text{max}}$ (например, $4-5$ °C) и $M = 0$ система переходит в режим «догрева» с уменьшенной мощностью ($u = u_{\text{hold}}$).
5. Условие отключения:
 - если в течение интервала τ_{dry} датчик влаги показывает $M = 0$, а $T_s \geq T_{\text{off}}$ (например, $2-3$ °C), система переводится в режим ожидания ($u = 0$).
6. При поступлении информации о прогнозируемом снегопаде (например, из системы «умный дом» или метеослужбы) за время τ_{pre} до начала осадков возможно кратковременное превентивное включение системы (u_{pre}), обеспечивающее предварительный нагрев конструкции и сокращающее время активного снеготаяния.

Лимитирование мощности и зональное управление

В условиях ограниченной мощности электросети возможно введение ограничения P_{lim} на суммарную мощность системы подогрева. В этом случае тротуар

делится на несколько зон, каждая из которых подключается поочередно в соответствии с приоритетами (например, сначала вход в здание и пандус, затем второстепенные участки) [14, 15]. При наличии N зон с удельной мощностью q_h и площадями A_i ($i = 1, \dots, N$) должно выполняться условие:

$$\sum_{i=1}^N (u_i \cdot q_h \cdot A_i) \leq P_{\text{lim}}, \quad (9)$$

где u_i — доля времени включения i -й зоны.

Распределение u_i по зонам может выполняться по алгоритму, аналогичному управлению нагрузками в системах управления микросетями, с учетом весовых коэффициентов важности зон.

Результаты

Сравнение режимов управления

Рассмотрим типичный зимний день с несколькими снегопадами суммарной продолжительностью τ_{snow} и отрицательной температурой воздуха $T_a \approx -5 \dots -10$ °С. Для упрощения примем удельную установленную мощность системы $q_h = 250$ Вт/м²:

1. Простейшее управление по температуре воздуха.

При использовании только термостата, срабатывающего при $T_a \leq 0$ °С, система может быть включена в течение всего периода отрицательных температур, например $\tau_{\text{air}} = 10$ ч/сут. Тогда удельное энергопотребление за сутки:

$$e_{\text{air}} = q_h \cdot \tau_{\text{air}} = 250 \cdot 10 = 2500 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2 = 2,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2.$$

2. Управление по датчику температуры поверхности.

За счет учета тепловой инерции плиты и отключения при достижении $T_s \geq T_{\text{max}}$ время работы сокращается, например, до $\tau_{\text{surf}} = 6-7$ ч. Тогда:

$$e_{\text{surf}} \approx 250 \cdot 6,5 \approx 1625 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2 \approx 1,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2.$$

Экономия по сравнению с e_{air} составляет около 35%.

3. Комбинированное управление по температуре и влажности.

Если система включается только при наличии осадков и влаги ($M = 1$), а при сухой поверхности отключается, то при суммарной продолжительности снегопадов $\tau_{\text{snow}} = 3$ ч и некотором дополнительном времени догрева $\tau_{\text{afterrun}} = 1$ ч получаем $\tau_{\text{comb}} \approx 4$ ч. Удельное энергопотребление:

$$e_{\text{comb}} = 250 \cdot 4 = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2 = 1,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2.$$

В этом случае экономия относительно простого управления по температуре воздуха составляет:

$$S = \frac{e_{\text{air}} - e_{\text{comb}}}{e_{\text{air}}} \cdot 100\% \approx (2,5 - 1,0) / 2,5 \cdot 100\% \approx 60\%. \quad (10)$$

Полученная оценка соответствует данным производителей датчиков льда и влаги, которые указывают возможное снижение энергопотребления до 80% по сравнению с простым воздушным термостатом при правильно настроенной системе.

Влияние прогнозного управления

Дополнительное снижение энергопотребления возможно за счет прогнозного управления, при котором система заранее подогревает плиту перед началом осадков и снижает мощность на стадии стабилизации температуры. Это позволяет уменьшить максимальную требуемую удельную мощность q_h при сохранении качества снеготаяния либо быстрее достигать требуемой температуры T_s при тех же установленных мощностях [16–19]. Количественная оценка эффекта прогнозного управления требует детального моделирования с учетом конкретных метеоусловий, теплофизических свойств конструкции и алгоритмов ограничения мощности, однако уже на качественном уровне очевидно, что объединение информации датчиков и погодного прогноза дает дополнительный потенциал экономии энергии.

Имитационное моделирование суточной работы системы

Для подтверждения аналитических оценок на основе упрощенной модели теплового баланса выполнено имитационное моделирование суточной работы системы подогрева тротуара при различных алгоритмах управления.

В качестве основы использовано уравнение теплового баланса для поверхностного слоя конструкции:

$$C_{th} \cdot \frac{dT_s}{dt} = \dot{q}_h \cdot u(t) - U \cdot (T_s - T_a) - \dot{q}_{melt}(t), \quad (11)$$

где C_{th} — эффективная теплоемкость конструкции на единицу площади (Дж/(м²·К));

T_s — температура поверхности тротуара (°C);

T_a — температура наружного воздуха (°C);

\dot{q}_h — удельная установленная мощность нагревателя (Вт/м²);

$u(t)$ — относительное управляющее воздействие ($0 \leq u \leq 1$);

U — суммарный коэффициент теплопередачи (Вт/(м²·К));

$\dot{q}_{melt}(t)$ — удельная мощность, расходуемая на плавление снега и льда (Вт/м²).

Численное интегрирование уравнения выполнялось методом Эйлера вперед с шагом $\Delta t = 300$ с (5 мин.). В разностной форме модель записывалась как:

$$T_s(k+1) = T_s(k) + A, \quad (12)$$

$$A = \left(\frac{\Delta t}{C_{th}} \right) \cdot (\dot{q}_h \cdot u(k) - U \cdot (T_s(k) - T_a(k)) - \dot{q}_{melt}(k)), \quad (13)$$

где k — номер шага по времени.

Для численной оценки приняты типичные параметры бетонной плиты толщиной $h = 0,10$ м: плотность бетона $\rho = 2400$ кг/м³, удельная теплоемкость $c = 880$ Дж/(кг·К), что дает эффективную теплоемкость:

$$C_{th} = \rho \cdot c \cdot h \approx 2,1 \cdot 10^5 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (14)$$

Суммарный коэффициент теплопередачи выбран $U = 10$ Вт/(м²·К), что отражает совокупное влияние конвекции, теплопроводности вглубь конструкции и излучения. Удельная установленная мощность системы принята $\dot{q}_h = 250$ Вт/м².

Мощность, расходуемая на плавление снега, учитывалась только при наличии осадков ($M = 1$) и отрицательной температуре поверхности ($T_s \leq 0$ °С) и задавалась в виде постоянного потока:

$$\dot{q}_{\text{melt}} = 80 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

что соответствует снегопаду умеренной интенсивности. В сухом режиме ($M = 0$) полагалось $\dot{q}_{\text{melt}} = 0$.

В качестве возмущающих воздействий использован упрощенный суточный профиль температуры наружного воздуха и осадков, имитирующий переходный зимний день: ночное снижение температуры до -8 °С, дневной прогрев до $+1 \dots +2$ °С и два эпизода снегопада общей продолжительностью порядка 3–4 ч при отрицательной температуре. При таком профиле суммарная длительность отрицательных температур $T_a \leq 0$ °С составляет около 10 ч, что соответствует предпосылкам для расчетов.

В рамках моделирования сравнивались три алгоритма управления:

1. *Простой термостат по температуре воздуха.*

Нагрев включается при $T_a \leq 0$ °С и выключается при $T_a > 0$ °С:

если $T_a \leq 0$ °С, то $u = 1$;

если $T_a > 0$ °С, то $u = 0$.

2. *Управление по температуре поверхности.*

Используется гистерезис по T_s с порогами $T_{\min} = 0$ °С и $T_{\max} = 3$ °С:

если $T_s \leq T_{\min}$, то $u = 1$;

если $T_s \geq T_{\max}$, то $u = 0$.

В интервале $T_{\min} < T_s < T_{\max}$ режим определяется предысторией (характерный «релейный» регулятор).

3. *Комбинированное управление по температуре и наличию влаги.*

Алгоритм соответствует логике ручного термостатного управления с выбором порогов $T_{\text{crit}} = 0$ °С, $T_{\min} = 0$ °С, $T_{\max} = 3$ °С и учетом небольшого времени догрева $\tau_{\text{afterun}} \approx 1$ ч после окончания снегопада:

если ($T_a \leq T_{\text{crit}}$ И $M = 1$) ИЛИ ($T_s \leq T_{\min}$), то $u = 1$;

если ($M = 0$ И $T_s \geq T_{\max}$), то $u = 0$.

Таким образом, при комбинированном управлении нагрев включен только при наличии осадков и/или при охлаждении поверхности до окрестности точки таяния, а при сухой теплой поверхности ($M = 0, T_s \geq T_{\max}$) система переходит в режим ожидания.

Для каждого алгоритма по результатам моделирования рассчитывались суточная длительность работы нагревателя:

$$\tau_{\text{on}} = \sum (k = 1 \rightarrow N) (u(k) \cdot \Delta t) \quad (15)$$

и удельное энергопотребление за сутки:

$$e_{\text{sp}} = \dot{q}_h \cdot \tau_{\text{on}}, \quad (16)$$

что согласуется с аналитическим выражением $e_{\text{sp}} = \dot{q}_h \cdot \tau_{\text{on}}$, приведенным ранее.

Полученные результаты показывают, что при простом управлении по температуре воздуха нагреватель включен практически на весь период отрицательных температур ($\tau_{\text{air}} \approx 10$ ч/сут.), при этом температура поверхности T_s в отсутствие снега достигает 8–12 °С, то есть существенно выше точки таяния. Соответствующее удельное энергопотребление составляет порядка $e_{\text{air}} \approx 2,5$ кВт·ч/м², что совпадает с оценкой.

При управлении по датчику температуры поверхности длительность работы системы уменьшается до $\tau_{\text{surf}} \approx 6-7$ ч/сут. Температура T_s большую часть времени удерживается в диапазоне 0...+3 °С, а перегрев поверхности существенно сокращается. Расчет дает удельное энергопотребление $e_{\text{surf}} \approx 1,6$ кВт·ч/м², то есть экономия по сравнению с простым термостатом по воздуху составляет порядка 35% [20, 21].

Комбинированный алгоритм, учитывающий наличие влаги на поверхности, позволяет еще сильнее уменьшить τ_{on} . Нагрев включен только во время снегопадов и короткого догрева после их окончания, поэтому суммарная длительность активного режима уменьшается до $\tau_{\text{comb}} \approx 4$ ч/сут. Соответствующее удельное энергопотребление составляет $e_{\text{comb}} \approx 1,0$ кВт·ч/м², а суммарная экономия относительно простого управления по температуре воздуха достигает:

$$S = \frac{e_{\text{air}} - e_{\text{comb}}}{e_{\text{air}}} \cdot 100 \% \approx 60 \%. \quad (17)$$

Результаты моделирования практически совпадают с оценками и дополнительно показывают, что при комбинированном управлении условия $M = 1$ и $T_s < 0$ °С возникают лишь кратковременно в начале эпизода снегопада [22]. Это обеспечивает приемлемый уровень безопасности движения при заметном снижении энергопотребления.

Обсуждение

Для наглядного представления результатов моделирования на рис. 1 показаны суточные зависимости $T_a(t)$, $T_s(t)$ и управляющего воздействия $u(t)$ для трех рассмотренных алгоритмов управления. Видно, что при простом термостате по температуре воздуха $u(t)$ остается активным практически на весь интервал отрицательных температур, тогда как при управлении по поверхности и комбинированном алгоритме интервалы работы нагревателя существенно сокращаются.

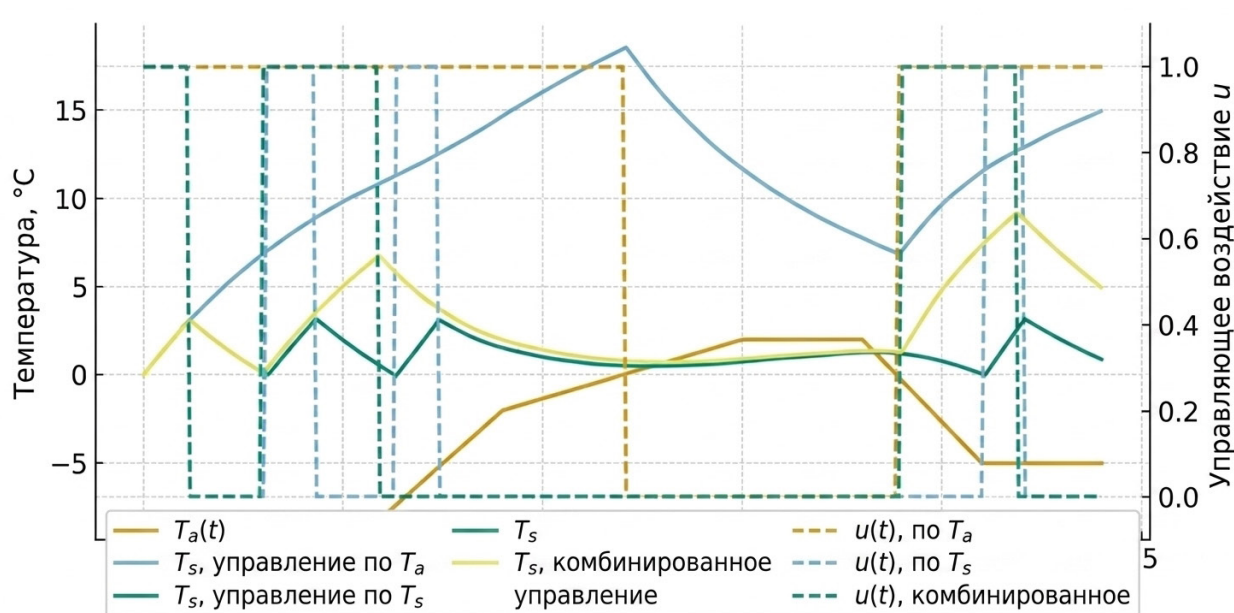


Рис. 1. Суточные зависимости температуры воздуха $T_a(t)$, температуры поверхности тротуара $T_s(t)$ и управляющего воздействия $u(t)$ при различных алгоритмах управления подогревом

На рис. 2 приведено сравнение удельного суточного энергопотребления e_{air} , e_{surf} и e_{comb} в виде столбчатой диаграммы. График наглядно демонстрирует снижение энергозатрат при переходе от простого управления по температуре воздуха к комбинированному алгоритму более чем в 1,5–2 раза, что подтверждает целесообразность применения предложенной структуры системы автоматического управления энергопотреблением подогреваемого тротуара.

Такие графики позволяют визуально продемонстрировать сокращение времени работы системы и снижение перегрева поверхности при переходе от простого термостата к комбинированному алгоритму, что подтверждает эффективность предложенной структуры системы автоматического управления энергопотреблением.

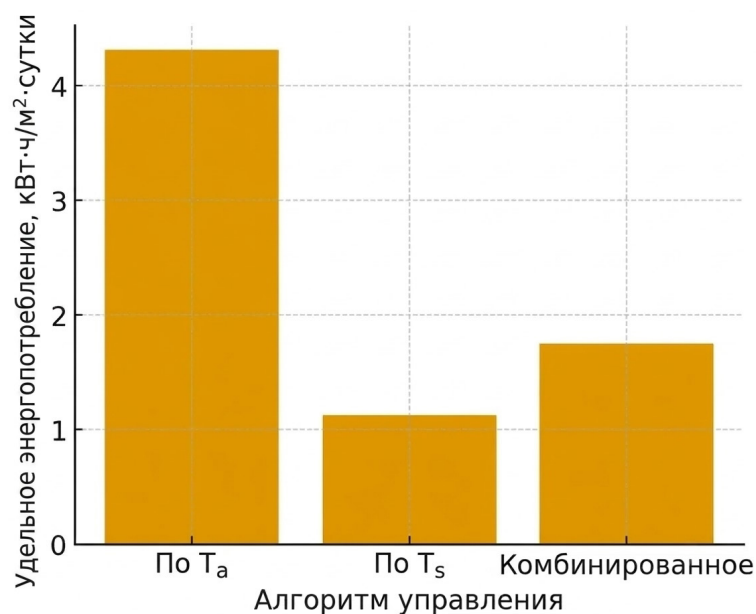


Рис. 2. Удельное суточное энергопотребление e_{air} , e_{surf} , e_{comb} для различных алгоритмов управления подогревом тротуара

Заключение

В работе проведен анализ существующих способов управления системами электрического подогрева тротуаров на основе резистивного кабеля и предложена структурная схема системы автоматического управления энергопотреблением. Показано, что традиционное управление только по температуре наружного воздуха приводит к значительным избыточным затратам электроэнергии вследствие работы системы при сухой поверхности и благоприятных условиях. Переход к управлению по температуре поверхности позволяет учесть тепловую инерцию конструкции и уменьшить время работы нагревателей. Наибольший эффект дает комбинированное управление по температуре и наличию влаги/осадков, при котором система включается только при реальной необходимости снеготаяния и автоматически отключается после устранения снега и льда.

На основе упрощенной теплотехнической модели подогреваемой плиты показано, что применение комбинированных датчиков и соответствующих алгоритмов управления позволяет снизить удельное энергопотребление системы до 50–60% и более по сравнению с простым управлением по температуре воздуха, что согласуется с данными производителей коммерческих систем снеготаяния. Дополнительный потенциал экономии энергии связан с внедрением прогнозного управления на основе метеоданных и ограничением мощности за счет зонального подключения нагрузок. Предложенная архитектура и алгоритмы управления могут быть использованы при проектировании новых систем подогрева тротуаров, а также при модернизации существующих установок, где до настоящего времени применялось только ручное или простое термостатное управление.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Повышение энергоэффективности распределенных систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, №4. С. 15–25.
2. Лаптев А.Г., Шарафутдинов Р.А. Интеллектуальные системы управления электропотреблением зданий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, №3. С. 42–52.
3. Фарахов Т.М., Сафиуллин Р.Н. Гибкие алгоритмы управления нагрузками в интеллектуальных энергосистемах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, №2. С. 60–69.
4. Лаптев А.Г., Габдрахманов Н.Ф. Повышение энергетической эффективности инженерных систем зданий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. №2. С. 33–41.
5. Фарахов Т.М., Хасанова Э.Р. Автоматизированные системы управления энергопотреблением // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. №4. С. 58–66.
6. Соловьев Б.А., Хазиева Р.Т., Гамисония Г.К. Генерация энергии на основе эффекта Зеебека с использованием модулей Пельтье // Электротехнические системы и комплексы. 2023. №2. С. 44–52.
7. Шостаковский П.Г. Термоэлектрические источники питания для электронной аппаратуры // Компоненты и технологии. 2016. №1. С. 90–95.
8. Иванов М.А., Соловьев Б.А. Термоэлектрические генераторы в системах рекуперации тепла // Энергосбережение. 2022. №6. С. 38–45.
9. Аюпов А.Д., Соловьев Б.А. Анализ эффективности систем утилизации низкопотенциального тепла // Электрические станции. 2021. №9. С. 31–38.
10. Хазиева Р.Т., Соловьев Б.А. Автономное электропитание датчиков на основе термоэлектрических генераторов // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020. №5. С. 22–28.
11. Гамисония Г.К., Соловьев Б.А. Энергосбор в интеллектуальной городской инфраструктуре // Городское хозяйство и экология. 2019. №3. С. 14–21.
12. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. М.: Госстрой России, 2018.
13. ГОСТ Р 54852-2011. Системы электрического обогрева поверхностей.
14. Шостаковский П.Г. Термоэлектрические генераторы промышленного применения // Современная электроника. 2015. №1. С. 2–8.
15. A Comprehensive Review of Thermoelectric Generators / N. Jaziri [et al.] // Energy Reports. 2020. Vol. 6. Pp. 264–287.
16. Lund H., Østergaard P.A. Smart Energy Systems and Flexibility // Energy. 2020. Vol. 195. Art. 116982.
17. Li Y., Wu J., Zhang X. Energy-Efficient Control of Electric Heating Systems // Applied Energy. 2021. Vol. 285. Art. 116402.
18. Pfeiffelmann B., Benim A. C., Joos F. Water-Cooled Thermoelectric Generators // Energies. 2021. Vol. 14, no. 24. Art. 8329.

19. Kim J., Park S. Adaptive Control Strategies for Snow-Melting Systems // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 214. Art. 118876.
20. Thermoelectric Generators for Waste Heat Recovery / M. Saha [et al.] // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023. Vol. 59. Art. 103394.
21. Goldsmid H.J. Thermoelectric Refrigeration and Power Generation. London: Taylor & Francis, 2017.
22. Snyder G.J., Toberer E.S. Complex Thermoelectric Materials // *Nature Materials*. 2008. Vol. 7. Pp. 105–114.

Дата поступления: 30.03.2026

Решение о публикации: 24.05.2026

Контактная информация:

СОЛОВЬЕВ Богдан Алексеевич — ассистент; SolovevBA@mail.ru

ГАМИСОНИЯ Гиорги Кахаберович — аспирант; giorgi111@gmail.com

АЮПОВ Арслан Динарович — студент; arslanaupov31@gmail.com

ХАЗИЕВА Регина Тагировна — кандидат техн. наук, доцент; KhazievaRT@mail.ru

Automatic Energy Consumption Control System for Heated Sidewalks Based on Resistive Cables

B. A. Solov'ev, G. K. Gamisonia, A. D. Ayupov, R. T. Khazieva

Ufa State Petroleum Technical University, 1 Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russia

For citation: *Solov'ev B. A., Gamisonia G. K., Ayupov A. D., Khazieva R. T. Automatic Energy Consumption Control System for Heated Sidewalks Based on Resistive Cables // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 187–205. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-187-205 (In Russian)*

Abstract

Purpose: development of an approach to automatic power consumption control for electric sidewalk heating systems based on resistive heating cables, ensuring minimal electricity consumption while maintaining the required level of anti-icing protection. **Methods:** a review and classification of existing control principles for snow melting systems is performed, ranging from simple air temperature thermostats to combined systems with surface temperature sensors, humidity sensors, and weather-dependent algorithms. For a comparative analysis of the effectiveness of various control strategies, a simplified thermal model of a heated slab is used, implemented using the numerical integration method (Euler's method) with a discretization step of 5 minutes. Energy consumption assessment is carried out based on the heat balance equation, taking into account the supplied power, heat losses, and the energy required for phase transition. **Results:** a block diagram of the automatic control system is proposed, including a power section, measuring components (air temperature, surface temperature, and humidity sensors), and a microprocessor controller capable of implementing logic and PID algorithms. Based on simulation of the system's daily operation, it is established that switching from simple air temperature control to surface temperature control reduces energy consumption by 35 %, while applying a combined algorithm that accounts for the presence of moisture/precipitation reduces it by 60 % (from 2.5 to 1.0 kWh/m²). It is shown that the integration of forecast data and zonal power limiting creates

additional energy saving potential. **Practical importance:** the obtained results can be used in the design of new and modernization of existing electric heating systems for sidewalks, entrance areas, ramps, and other urban infrastructure facilities. The proposed algorithms and system architecture allow for a well-founded choice of control strategy, ensuring a significant reduction in operational electricity costs without compromising pedestrian safety conditions.

Keywords: electric sidewalk heating, resistive heating cable, snowmelt, automatic control, power consumption, humidity sensor, temperature sensor

References

1. Farakhov T. M., Laptev A. G. Povyshenie energoeffektivnosti raspredelennykh sistem elektrosnabzheniya [Improving the Energy Efficiency of Distributed Power Supply Systems], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems]*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 15–25. (In Russian)
2. Laptev A. G., Sharafutdinov R. A. Intellectual'nye sistemy upravleniya elektropotrebleniem zdaniy [Intelligent Power Management Systems for Buildings], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems]*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 42–52. (In Russian)
3. Farakhov T. M., Safiullin R. N. Gibkie algoritmy upravleniya nagruzkami v intellektual'nykh energosistemakh [Flexible Load Management Algorithms in Intelligent Power Systems], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems]*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 60–69. (In Russian)
4. Laptev A. G., Gabdrakhmanov N. F. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti inzhenernykh sistem zdaniy [Improving the Energy Efficiency of Building Engineering Systems], *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Kazan State Power Engineering University]*, 2021, no. 2, pp. 33–41. (In Russian)
5. Farakhov T. M., Khasanova E. R. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya energopotrebleniem [Automated Energy Management Systems], *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Kazan State Power Engineering University]*, 2020, no. 4, pp. 58–66. (In Russian)
6. Solov'ev B. A., Khazieva R. T., Gamisonia G. K. Generatsiya energii na osnove effekta Zeebeka s ispol'zovaniem modulej Pel't'e [Energy Generation Based on the Seebeck Effect Using Peltier Modules], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes]*, 2023, no. 2, pp. 44–52. (In Russian)
7. Shostakovskij P. G. Termoelektricheskie istochniki pitaniya dlya elektronnoj apparatury [Thermoelectric Power Supplies for Electronic Equipment], *Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies]*, 2016, no. 1, pp. 90–95. (In Russian)
8. Ivanov M. A., Solov'ev B. A. Termoelektricheskie generatory v sistemakh rekuperatsii tepla [Thermoelectric Generators in Heat Recovery Systems], *Energoberezhenie [Energy Saving]*, 2022, no. 6, pp. 38–45. (In Russian)
9. Ayupov A. D., Solov'ev B. A. Analiz effektivnosti sistem utilizatsii nizkopotentsial'nogo tepla [Efficiency Analysis of Low-Potential Heat Recovery Systems], *Elektricheskie stantsii [Electric Stations]*, 2021, no. 9, pp. 31–38. (In Russian)

10. Khazieva R. T., Solov'ev B. A. Avtonomnoe elektropitanie datchikov na osnove termoelektricheskikh generatorov [Autonomous Power Supply of Sensors Based on Thermoelectric Generators], *Avtomatizatsiya i IT v energetike [Automation and IT in the Energy Sector]*, 2020, no. 5, pp. 22–28. (In Russian)
11. Gamisonia G. K., Solov'ev B. A. Energosbor v intellektual'noj gorodskoj infrastrukture [Energy Efficiency in Intelligent Urban Infrastructure], *Gorodskoe khozyajstvo i ekologiya [Urban Economy and Ecology]*, 2019, no. 3, pp. 14–21. (In Russian)
12. SNiP 23-01-99*. Stroitel'naya klimatologiya [Building climatology], Moscow, Federal Agency for Construction and Housing and Communal Services Federal Agency for Construction and Housing and Communal Services of Russia, 2018. (In Russian)
13. GOST R 54852-2011. Sistemy elektricheskogo obogreva poverkhnostej [Electric Surface Heating Systems]. (In Russian)
14. Shostakovskij P. G. Termoelektricheskie generatory promyshlennogo primeneniya [Thermoelectric Generators of Industrial Application], *Sovremennaya elektronika [Modern Electronics]*, 2015, no. 1, pp. 2–8. (In Russian)
15. Jaziri N., et al. A Comprehensive Review of Thermoelectric Generators, *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 264–287.
16. Lund H., Østergaard P. A. Smart Energy Systems and Flexibility, *Energy*, 2020, vol. 195, Art. 116982.
17. Li Y., Wu J., Zhang X. Energy-Efficient Control of Electric Heating Systems, *Applied Energy*, 2021, vol. 285, art. 116402.
18. Pfeiffelmann B., Benim A. C., Joos F. Water-Cooled Thermoelectric Generators, *Energies*, 2021, vol. 14, no. 24, art. 8329.
19. Kim J., Park S. Adaptive Control Strategies for Snow-Melting Systems, *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 214, art. 118876.
20. Saha M., et al. Thermoelectric Generators for Waste Heat Recovery, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, vol. 59, art. 103394.
21. Goldsmid H. J. Thermoelectric Refrigeration and Power Generation, London, Taylor & Francis, 2017.
22. Snyder G. J., Toberer E. S. Complex Thermoelectric Materials, *Nature Materials*, 2008, vol. 7, pp. 105–114.

Received: March 30, 2026

Accepted: May 24, 2026

Author's information:

Bogdan A. SOLOV'EV — Assistant; SolovevBA@mail.ru

Giorgi K. GAMISONIA — Postgraduate Student; giorgi111@gmail.com

Arslan D. AYUPOV — Student; arslanaupov31@gmail.com

Regina T. KHAZIEVA — PhD in Engineering, Associate Professor; KhazievaRT@mail.ru

УДК 620.9: 621.311

Интеллектуальные системы учета потерь тепловой энергии

Е. Л. Рыжова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Рыжова Е. Л. Интеллектуальные системы учета потерь тепловой энергии // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 206–216. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-206-216

Аннотация

Цель: рассмотреть вопрос о необходимости комплексной оценки эффективности использования интеллектуальных систем учета потерь тепловой энергии, их потенциала. Показать необходимость снижения потерь, которые непосредственно влияют на уменьшение потребления энергоресурсов, что, в свою очередь, ведет к сокращению выбросов парниковых газов и других вредных веществ в атмосферу. Предложить технологии внедрения систем учета потерь тепловой энергии в общую цифровую инфраструктуру для создания единого информационного пространства. **Методы:** рассмотрен широкий спектр интеллектуальных систем учета потерь тепловой энергии, отличающихся функционалом и используемыми технологиями. Проведен сравнительный анализ интеллектуальных автоматизированных систем учета тепла на основе данных с применением статистической обработки, который позволяет выявить взаимосвязи между внутренней температурой в помещении, температурой наружного воздуха и величины тепловых потерь. **Результаты:** показана необходимость объективного контроля расхода энергоносителей на основе данных о тепловых потерях, позволяющего выявить неэффективные участки в системах теплоснабжения. Установлено, что анализ данных о потерях тепловой энергии позволяет не только оценить текущее состояние интеллектуальных систем учета, но и прогнозировать их изменение в различных условиях, что является основой для взаимодействия таких систем с другими интеллектуальными комплексными системами мониторинга и управления энергопотреблением, что значительно повышает общий уровень их энергоэффективности. Выявлена необходимость внедрения интеллектуальных систем учета потерь тепловой энергии, использования энергосберегающих мероприятий, которые позволяют обеспечить снижение эксплуатационных расходов, повысить надежность систем теплоснабжения и снизить нагрузки на окружающую среду за счет сокращения выбросов парниковых газов. **Практическая значимость:** показана необходимость принятия обоснованных решений, направленных на минимизацию потерь, оптимизацию режимов работы оборудования и, как следствие, сокращение затрат на энергоресурсы. Методики для диагностики и устранения причин тепловых потерь позволяют выявлять дефекты изоляции, нарушения режимов работы интеллектуальных систем учета потерь тепловой энергии и других факторов, приводящих к нерациональному расходу тепловой энергии.

Ключевые слова: тепловая энергия, интеллектуальная система, учет потерь тепловой энергии, энергосбережение, энергоэффективность

Введение

Российское правительство взяло курс на активизацию инноваций в теплоэнергетике. Государство старается поддерживать передовые решения там, где речь идет о росте энергоэффективности, внедрении возобновляемых источников энергии и развитии интеллектуальных систем. Стратегия развития энергетики Российской Федерации увязывает энергетическую и экологическую безопасность

с устойчивым ростом экономики, повышением качества жизни и структурной перестройкой в пользу менее энергоемких производств. Инновационный подход в теплоэнергетике подразумевает развитие интеллектуальных энергосистем, оказывающих непосредственное влияние на объемы энергопотребления и показатели эффективности использования энергии, благодаря модернизации отрасли, оптимизации ее инфраструктуры и повышению качества предоставляемых услуг [1].

Материалы и методы

Без объективного учета потерь внедрение энергосберегающих технологий невозможно. По данным исследований, теплотери порой достигают 50%, обрачиваясь колоссальным перерасходом отопительных ресурсов [2]. Отдельная проблема — учет индивидуального потребления тепла в жилищно-коммунальном хозяйстве (ЖКХ). Популярны за границей электронные распределители тепла обладают высокой погрешностью, так как они не замеряют тепловую энергию напрямую, а лишь оценивают долю от общего потребления. Существующие методы учета в многоквартирных домах неточны, отчего остро требуется создание принципиально новых систем, способных напрямую измерять потребление тепла и давать точную картину теплотери. Только это позволит по-настоящему эффективно управлять ресурсами и внедрять энергосберегающие технологии. Следовательно, необходимы современные и при этом недорогие способы оценки теплотери жилых и производственных помещений. Сегодня ведутся активные поиски методов прямого определения индивидуального потребления тепловой энергии, но универсального и одновременно эффективного решения, применимого ко всем типам отопительных систем, пока нет. Создание интеллектуальной системы учета потерь на базе прямого измерения тепловой энергии остается важнейшей задачей. Ее решение критически значимо для объективного контроля расхода теплоносителей и внедрения энергосберегающих технологий, прежде всего в ЖКХ [3, 4].

Современные технологии уже позволяют строить умные дома и предприятия, где каждый потраченный киловатт-час тепла на счету. Это выгодно обеим сторонам: поставщик получает инструмент для анализа экономического эффекта, а потребитель — доступ к реальным данным о текущем расходе и возможность планировать будущее потребление. Установка узлов учета тепла помогает избежать излишних затрат и получить реальную экономию. Коммерческий учет теплотери в теплоснабжающих системах ведется приборами, смонтированными на точках ввода теплоносителя в здании или на предприятии. Тепловычислители фиксируют ключевые показатели: расход теплоносителя, а также его температуры на подающей и обратной магистралях.

На основе этой информации точно рассчитывается потребленная тепловая энергия в гигакалориях. Интеллектуальные системы учета потерь тепловой энергии (ИСУП) — это автоматизированные комплексы контроля и учета, которые

сами собирают показания, обрабатывают их и анализируют, чтобы выявить потери тепловой энергии и оптимизировать потребление. Такие системы востребованы в теплосетях для получения актуальной картины расхода тепла, в управляющих компаниях ЖКХ — для удаленного мониторинга состояния приборов учета и оповещений о вмешательстве в их работу, на предприятиях — для контроля и анализа работы узлов теплоснабжения.

Автоматизированные ИСУП в реальном времени отслеживают технические параметры тепловых систем (расход, давление, температуру), контролируют состояние оборудования: заслонок, задвижек, регулирующих клапанов. Случилась неисправность — система сигнализирует об этом и автоматически запускает меры по ее устранению. Когда расход тепла снижается, например по сезонным причинам, узел учета тепла может сам переходить в режим энергосбережения, управляя нагрузкой без участия оператора. Посекционный анализ энергопотребления помогает локализовать участки с наибольшим расходом и выяснить причины этого перерасхода. Автоматизированные системы позволяют оперативно замечать утечки и потери тепла, дают точные данные для оценки общей энергоэффективности объекта, а автоматический сбор и обработка данных ведут к снижению эксплуатационных расходов. При этом системы относительно легко интегрируются в существующую инфраструктуру [5, 6].

У ИСУП есть ряд особенностей. Они непрерывно в автоматическом режиме отслеживают термодинамические параметры теплоносителя, выполняют расчеты, передают измерения в базу данных для хранения и выводят результаты через различные индикаторы. За счет виртуальных измерительных каналов можно контролировать потребление тепла в общедомовых и коммерческих помещениях. Оборудование автоматически корректирует подачу тепла в квартиры в зависимости от погодных условий, оптимизируя затраты и уменьшая потери. Фактически оно само отслеживает колебания температуры на улице и выбирает нужный режим подачи тепла. В итоге появляется возможность управлять затратами на теплоэнергию, регулировать потребление и минимизировать энергопотери [4, 7].

Показания умных счетчиков передаются проводным или беспроводным путем. Среди беспроводных технологий — Wi-Fi, NB-IoT, LPWAN, GPRS, Bluetooth, ZigBee, Z-Wave. Интеллектуальные системы учета состоят из самого прибора (с интерфейсом для передачи) и отдельного модуля обработки и отправки данных, объединенных в одном корпусе. В их состав входят измерительные компоненты: термодатчики, тепловычислители, расходомеры и датчики давления. Электронные блоки управления собирают информацию с датчиков, систематизируют ее, хранят в цифровом виде. Сетевое оборудование объединяет компоненты системы и обеспечивает передачу данных по интернет-протоколу локально или удаленно. Современные умные счетчики умеют выполнять и дополнительные функции: контролировать внезапную остановку потребления, отслеживать чрезмерный расход [7].

Интеллектуальные системы, или умные счетчики, можно классифицировать по разным признакам. Разные виды ИСУП способны выполнять разный набор функций. Например, в автоматизированные системы контроля и учета тепла (АСКиУТ) для беспроводного сбора и передачи информации входят установленные на системах отопления шлюзы, принимающие данные от теплосчетчиков по радиосвязи. Без таких функциональных устройств, как узлы учета тепловой энергии (УУТЭ), современные коммунальные объекты уже трудно представить. УУТЭ — это комплекс измерительных устройств, предназначенных для анализа поступающей тепловой энергии и измерения массы и характеристик теплоносителя. Учет тепловой энергии необходим для коммерческих взаиморасчетов между потребителями и энергоснабжающими организациями на основе показаний приборов. УУТЭ работает на удаленном управлении, собирает и хранит данные о потреблении на конкретном участке сети, и с него в любой момент можно извлечь информацию о текущем состоянии и потребленной электроэнергии за нужный период времени [8].

Автоматизированная информационно-измерительная система (АИИС) учета тепла сводит данные со всех узлов в единую цифровую платформу — от удаленного сбора показаний до формирования отчетности. Система регулярно, без выезда персонала опрашивает тепловычислители через модемы по GPRS/4G/Ethernet, автоматически проверяет показания на отклонения, сбои и попытки вмешательства, рассчитывает объем потребленной тепловой энергии, анализирует баланс и выявляет коммерческие потери. Помимо этого, она отслеживает соблюдение температурных графиков, фиксирует аварийные ситуации, уведомляя ответственных, а затем формирует отчеты для взаиморасчетов на основе собранных данных. Вся информация доступна через онлайн-интерфейс и может быть выгружена в любом формате [5].

Внедрение автоматизированной системы комплексного учета теплоресурсов (АСКУТ) дает следующие результаты:

- рациональное расходование всех видов теплоресурсов за счет сокращения времени на сбор и обработку данных;
- уменьшение производственных и непроизводственных теплопотерь благодаря более высокой точности учета, невозможности занижать объемы потребления и предотвращению хищений;
- ускорение взаиморасчетов за счет своевременного выявления сверхнормативного потребления и ведения объективного автоматизированного учета;
- возможность интеграции с системами учета природного газа и электроэнергии, что позволяет создавать комплексную систему управления энергоресурсами.

В целом применение АИИС и АСКУТ повышает эффективность, точность, контроль и прозрачность в потреблении и распределении тепла. Они автоматизируют процессы, снижают влияние человеческого фактора, предотвращают хищения и потери, а также оптимизируют финансовые расчеты [9].

Результаты исследования

Для реализации интеллектуальной системы учета тепловой энергии применяется, в частности, web-SCADA-система «Энергоатлас». Она способна интегрировать собственные протоколы приборов учета ресурсов и энергии, а также подключать программируемые контроллеры по проводным и беспроводным каналам, создавая гибридные сети. В качестве интеллектуального компонента выступает датчик температуры Dallas Semiconductor DS18S20. Специализированное программное обеспечение собирает температурные показатели для последующего статистического анализа, отображая их в реальном времени в графическом и числовом виде. Комплексная статистическая обработка данных за разные сезоны дает возможность выявить взаимосвязи между внутренней температурой помещения, температурой наружного воздуха и величинами тепловых потерь. Такой подход позволяет определять теплопотери в жилых и производственных зданиях с учетом их специфики, а также потери тепла через наружные конструкции [10].

Другой пример — интеллектуальная автоматизированная система учета тепла НЕКТА, созданная для точного учета теплоснабжения в зданиях и сооружениях. Она позволяет энергетикам точнее планировать и управлять потреблением тепла, что в долгосрочной перспективе оборачивается экономией. НЕКТА дает возможность энергетикам более детально планировать и контролировать потребление тепла, что в дальнейшем ведет к снижению расходов. Система обеспечивает сбор, обработку, хранение и анализ показаний с теплосчетчиков, установленных у потребителей, в реальном времени удаленную передачу данных, обработанных информационно-вычислительным комплексом, и их отправку в общую систему НЕКТА [10, 11].

Применение интеллектуальных счетчиков учета тепловой энергии заметно повышает эффективность систем теплоснабжения как для поставщиков, так и для потребителей. Постоянный мониторинг потребления в реальном времени, который обеспечивают умные счетчики, дает возможность анализировать структуру расхода и внедрять действенные меры по энергосбережению. За счет двусторонней связи теплосетевые компании снимают показания дистанционно, и необходимость в физическом доступе к приборам попросту исчезает. Именно в этом главный плюс умных счетчиков: они убирают ручной сбор данных, экономя время и ресурсы. Точный и своевременный сбор информации повышает достоверность расчетов, благодаря чему потребители могут грамотнее планировать расходы и снижать энергопотребление, а следовательно, уменьшаются и счета за тепло.

Вместе с тем у интеллектуальных приборов учета тепла есть и серьезные минусы. Внедрение подобных систем сопряжено с проблемами конфиденциальности и кибербезопасности. Умный счетчик аккумулирует всю информацию

о теплоснабжении, и, если данные не защищены как следует, это открывает дорогу киберугрозам — от несанкционированного доступа и утечек до изменения показаний. Вдобавок такие счетчики обходятся ощутимо дороже традиционных аналогов, что увеличивает затраты на подключение для потребителей [13–15].

Защищенность пытаются повысить разными технологическими путями. Применяются сертифицированные ФСБ средства криптографической защиты информации, способные эффективно противостоять кибератакам. Асимметричное шифрование усложняет попытки взлома приборов учета. Встроенные механизмы регистрации фиксируют любые несанкционированные попытки проникновения или изменения заводских настроек, немедленно передавая тревожный сигнал в систему энергосбыта. Регулярные обновления программного обеспечения от производителей усиливают защитные алгоритмы. Блокчейн-технологии дают возможность создавать распределенные базы данных о потреблении, делая их более стойкими к кибератакам. Физическая защита электронных счетчиков обеспечивается установкой в охраняемых помещениях либо применением специальных защитных корпусов. А для гарантии целостности устройств нередко используют пломбы и прочие механизмы, предотвращающие вскрытие [16].

Заключение

Создание интеллектуальных энергосистем с целью снижения энергоемкости промышленности и повышения качества жизни граждан — это внедрение современных сетей, куда входят интеллектуальные счетчики учета тепловой энергии, возобновляемые источники энергии и энергосберегающие технологии. Системы интеллектуального учета тепла дают эффективный инструмент для управления и прогнозирования энергопотребления. Их преимущества, постоянное развитие, новые функции и интеграция с платформами умного дома в конечном счете перевешивают трудности внедрения.

Пока же движение вперед сдерживают потребность в крупных финансовых вливаниях, ограниченный годовой выпуск интеллектуальных счетчиков учета тепловой энергии и нехватка квалифицированных специалистов, из-за чего Россия отстает от западных стран в цифровизации телекоммуникационных систем нового поколения. Однако, несмотря на эти барьеры, интеллектуальные приборы учета тепла непрерывно совершенствуются, а их безопасность становится ключевым критерием при внедрении. Переход на интеллектуальные счетчики учета тепловой энергии все чаще воспринимают как стратегическую инвестицию, способствующую рациональному расходованию ресурсов и охране окружающей среды. Массовое применение таких устройств — важный шаг на пути к цифровой экономике в рамках концепции умного города. Поэтому интеллектуальные системы учета тепловой энергии и экономия тепловой энергии — это уже не просто связанные, а неразрывные понятия.

Список источников

1. Энергоэффективность и развитие умных сетей в регионах России / В.М. Матюшок [и др.] // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. 2019. №1 (57). С. 2. EDN PQBGUS
2. Гашо Е.Г., Козырь А.В. О комплексной оценке эффективности отопительных систем зданий в нерасчетных режимах // Проблемы энергетики. 2003. №3. С. 3–12. URL: <https://elibrary.ru/racczd> (дата обращения: 30.04.2026).
3. Оценка зависимости потерь энергии в тепловых сетях от теплофизических свойств внешних условий / Н.С. Ларин [и др.] // Студент. Аспирант. Исследователь. 2018. №9 (39). С. 250–256. EDN YLUXML
4. Штерн Ю.И., Кожевников Я.С., Рыгалин Д.Б. Интеллектуальная система и электронные компоненты для контроля потребления тепловой энергии // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2015. Т. 20, №5. С. 536–542. EDN UNSUTJ
5. Галиуллина Э.Р. Цифровой сервис приема и обработки показаний счетчиков потребителей с элементами интернета вещей и искусственного интеллекта // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2022. №6 (70). С. 465–469. EDN QRBPEE
6. Тахавутдинов Р.Г., Воркунов О.В. Компьютерная измерительная система распределенного контроля тепловых потерь // Современные наукоемкие технологии. 2005. №3. С. 66–67. EDN JJYOAX
7. Жмура И.Р. Сравнение современных методов моделирования потерь электроэнергии // Инновационные научные исследования. 2024. №11–1(47). С. 11–21. DOI: 10.5281/zenodo.14237518. EDN EIZJVU
8. Нестеров Н.А., Астапов В.Н. Перспективы использования цифровых систем диспетчерского управления в электроэнергетике, умные счетчики как инструмент модернизации // Международный студенческий научный вестник. 2025. №6. С. 4. EDN XSECSB
9. Автоматизированная система комплексного учета теплоресурсов. URL: https://www.krug2000.ru/decisions/solutions_comacc_ackyt.html (дата обращения: 30.04.2026).
10. Система мониторинга и управления «Энергоатлас». URL: <https://energoatlas.com/> (дата обращения: 30.04.2026).
11. Система учета тепла. Коммерческий и технический учет тепла. Телеметрия тепла. URL: <https://nehta.tech/askut/> (дата обращения: 30.04.2026).
12. Счетчики и умные системы: как экономить на отоплении до 30%. URL: <https://reality.rbc.ru/news/5f8efc3e9a79473f70a1d5e4?from=copy> (дата обращения: 30.04.2026).
13. Пугачева А.И. Оценка состояния теплоэнергетического комплекса Хабаровского края по уровню потерь тепловой энергии на различных этапах генерации // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых: в 4 ч. (Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года). Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. С. 242–246. EDN CSQPJT

14. Оценка потерь энергии в тепловых сетях по результатам испытаний режимов их работы / С. В. Юртаев [и др.] // XLVIII Огаревские чтения: материалы научной конференции: в 3 ч. (Саранск, 6–13 декабря 2019 года). Саранск: Национальный исследовательский мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, 2020. С. 388–393. EDN ZMБIОC

15. Машрапов А. А. Умные счетчики электрической энергии в интеллектуальных системах сбора данных // Потенциал и вызовы развития возобновляемой энергетики: сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Невинномыск, 22–26 декабря 2025 года). Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2026. С. 177–178. EDN ITJZKB

16. Гнаток Д. В. Умные счетчики электроэнергии // Электрооборудование, электротехнологии и энергетика АПК: сборник статей Научно-практической конференции, посвященной 200-летию Густава Роберта Кирхгофа (Екатеринбург, 21 февраля 2024 года). Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет, 2024. С. 9–14. EDN SFNCIO

Дата поступления: 01.05.2026

Решение о публикации: 29.05.2026

Контактная информация:

РЫЖОВА Елена Львовна — кандидат техн. наук, доцент; elena-astanovskaja@rambler.ru

Intelligent Thermal Energy Loss Accounting Systems

E. L. Ryzhova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Ryzhova E. L. Intelligent Thermal Energy Loss Accounting Systems // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 206–216. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-206-216 (In Russian)*

Abstract

Objective: to examine the need for a comprehensive energy efficiency assessment of intelligent heat loss metering systems and their potential. To demonstrate the need to reduce losses, which directly impacts primary energy consumption, which in turn leads to a reduction in greenhouse gas emissions and other harmful substances. To propose technologies for integrating heat loss metering systems into a common digital infrastructure to create a unified information space for managing energy flows and resources. **Methods:** a wide range of intelligent heat loss metering systems, differing in functionality and technologies, was examined. A comparative analysis of intelligent automated heat metering systems was conducted based on data collected over different seasons, using comprehensive statistical processing to identify relationships between indoor temperature, outdoor air temperature, and heat loss values. **Results:** the need for objective energy consumption monitoring based on accurate heat loss data has been demonstrated, allowing for the identification of inefficient areas in heating systems. It has been established that analyzing data from

intelligent heat loss metering systems not only allows for assessing the current state of systems but also predicting their behavior under various conditions. This provides the basis for integrating such systems with other intelligent integrated energy monitoring and management systems, significantly improving overall energy efficiency. This study identified the need to implement intelligent systems for recording heat energy losses and the use of approaches to assessing them and the effectiveness of energy-saving measures, which will reduce operating costs, increase the reliability of heat supply systems, and reduce the burden on the environment by reducing greenhouse gas emissions. **Practical significance:** The need for informed management decisions aimed at minimizing losses, optimizing equipment operating modes, and, consequently, reducing fuel and energy costs is demonstrated. The development of methods for diagnosing and eliminating the causes of heat loss will enable the identification of insulation defects, malfunctions of intelligent heat loss metering systems, and other factors leading to inefficient heat consumption. The development of energy-saving measures will ensure the comparability of the results of various systems and accelerate their implementation.

Keywords: thermal energy, intelligent system, thermal energy loss accounting, energy saving, energy efficiency, wireless information transmission technologies, hardware and software

References

1. Matyushok V.M. Energoeffektivnost i razvitiye umnykh setey v regionakh Rossii [Energy Efficiency and Development of Smart Grids in the Regions of Russia], *Regionalnaya ekonomika i upravleniye: elektronnyy nauchnyy zhurnal [Regional Economics and Management: Electronic Scientific Journal]*, 2019, no. 1 (57), p. 2. EDN PQBGUS (In Russian)
2. Gasho E.G., Kozyr' A.V. O kompleksnoy otsenke effektivnosti otopitelnykh sistem zdaniy v neraschetnykh rezhimakh [On a Comprehensive Assessment of the Efficiency of Building Heating Systems in Off-Design Modes], *Problemy energetiki [Energy Problems]*, 2003, no. 3, pp. 3–12. (In Russian)
3. Larin N.S., et al. Otsenka zavisimosti poter energii v teplovykh setyakh ot teplofizicheskikh svoystv vneshnikh usloviy [Assessment of the Dependence of Energy Losses in Heating Networks on the Thermophysical Properties of External Conditions], *Student. Aspirant. Issledovatel [Student. Postgraduate student. Researcher]*, 2018, no.9, pp. 250–256. EDN YLUXML (In Russian)
4. Stern Yu.I., et al. Intellektualnaya sistema i elektronnyye komponenty dlya kontrolya potrebleniya teplovoy energii [Intelligent System and Electronic Components for Monitoring Thermal Energy Consumption], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electronics]*, 2015, no.5, pp. 536–542. EDN UNSUTJ (In Russian)
5. Galiullina E.R. Tsifrovoy servis priema i obrabotki pokazaniy schetchikov potrebiteley s elementami interneta veshchey i iskusstvennogo intellekta [A Digital Service for Receiving and Processing Consumer Meter Readings with Elements of the Internet of Things and Artificial Intelligence], *Skif. Voprosy studencheskoy nauki [Scythian. Student Science Issues]*, 2022, no. 6, pp. 465–469. EDN QRBPEE (In Russian)
6. Takhavutdinov R. G., Vorkunov O. V. Komp'yuternaya izmeritel'naya sistema raspredelenno-go kontrolya teplovykh poter' [Computerized Measuring System for Distributed Heat Loss Control], *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii [Modern Science-Intensive Technologies]*, 2005, no. 3, pp. 66–67. EDN JJYOAX (In Russian)

7. Zhmura I. R. Sravnenie sovremennykh metodov modelirovaniya poter elektroenergii [Comparison of Modern Methods for Modeling Energy Losses], *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya [Innovative Scientific Research]*, 2024, no. 11, pp. 11–21. DOI: 10.5281/zenodo.14237518. EDN EIZJVU (In Russian)
8. Nesterov N. A. Perspektivy ispolzovaniya tsifrovyykh sistem dispetcherskogo upravleniya v elektroenergetike, umnye schetchiki kak instrument modernizatsii [Prospects for the Use of Digital Dispatch Control Systems in the Electric Power Industry, Smart Meters as a Modernization Tool], *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik [International Student Scientific Bulletin]*, 2025, no. 6, pp. 4–6, EDN XSECSB (In Russian)
9. Avtomatizirovannaya sistema kompleksnogo ucheta teploresursov [Automated System for Integrated Accounting of Heat Resources]. URL: https://www.krug2000.ru/decisions/solutions_comacc/ackyt.html (accessed: April 30, 2026). (In Russian)
10. Sistema monitoringa i upravleniya “Energoatlas” [Energy Atlas Monitoring and Control System]. URL: <https://energoatlas.com/> (accessed: April 30, 2026). (In Russian)
11. Sistema ucheta tepla. Kommercheskiy i tekhnicheskij uchet tepla. Telemetriya tepla [Heat Metering System. Commercial and Technical Heat Metering. Heat Telemetry]. URL: <https://nekta.tech/askut/> (accessed: April 30, 2026). (In Russian)
12. Schetchiki i umnye sistemy: kak ekonomit' na otoplenii do 30% [Meters and Smart Systems: How to Save Up to 30% on Heating]. URL: <https://realty.rbc.ru/news/5f8efc3c9a79473f70a1d5e4?from=copy> (accessed: April 30, 2026). (In Russian)
13. Pugacheva A. I. Otsenka sostoyaniya teploenergeticheskogo kompleksa Khabarovskogo kraya po urovnyu poter teplovoy energii na razlichnykh etapakh generatsii [Assessment of the State of the Thermal Power Complex of Khabarovsk Krai in Terms of the Level of Thermal Energy Losses at Various Stages of Generation], *Molodezh' i nauka: aktual'nyye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy [Youth and Science: Current Issues in Fundamental and Applied Research]*, Komsomolsk-on-Amur, April 11–15, 2022, Komsomolsk-on-Amur State University, 2022, pp. 242–246, EDN CSQPJT (In Russian)
14. Yurtaev S. V., et al. Otsenka poter' energii v teplovykh setyakh po rezul'tatam ispytaniy rezhimov ikh raboty [Assessment of Energy Losses in Heating Networks Based on the Results of Testing Their Operating Modes], *XLVIII Ogarevskie chteniya: materialy nauchnoj konferentsii [XLVIII Ogarev Readings: Proceedings Of The Scientific Conference]*, Saransk, December 06–13, 2019, Saransk: Ogarev National Research Mordovian State University, 2020, pp. 388–393. EDN ZMBIOC (In Russian)
15. Mashrapov A. A. Umnye schetchiki elektricheskoy energii v intellektual'nykh sistemakh sbora dannykh [Smart Electricity Meters in Intelligent Data Collection Systems], *Potentsial i vyzovy razvitiya vozobnovlyayemoy energetiki: sbornik materialov IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Potential and Challenges of Renewable Energy Development: Collection of Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation]*, Nevinnomyssk, December 22–26, 2025, Stavropol, North Caucasus Federal University, 2026, pp. 177–178, EDN ITJZKB (In Russian)

16. Gnatok D.V. Elektrooborudovanie, elektrotekhnologii i energetika APK: sbornik statej nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoj 200-letiyu Gustava Roberta Kirkhgofa [Smart Electricity Meters], *Elektrooborudovaniye, elektrotekhnologii i energetika APK. [Electrical Equipment, Electrical Technologies and Energy of the Agroindustrial Complex: A Collection of Articles from a Scientific and Practical Conference Dedicated to the 200th Anniversary of Gustav Robert Kirchoff]*, February 21, 2024, Yekaterinburg, Ural State Agrarian University, pp. 9–14. EDN SFNCIO (In Russian)

Received: May 01, 2026

Accepted: May 29, 2026

Author's information:

Elena L. RYZHOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; elena-astanovskaja@rambler.ru

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 657.6

Трансформация ценностных установок российского аудиторского рынка: текущее состояние и перспективы развития

Т. П. Сацук, А. Ю. Афанасьева

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сацук Т. П., Афанасьева А. Ю. Трансформация ценностных установок российского аудиторского рынка: текущее состояние и перспективы развития // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 217–228. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-217-228

Аннотация

Цель: провести комплексный анализ текущего состояния российского рынка аудиторских услуг в период 2021–2025 годов, выявить системные проблемы его развития и определить перспективные направления государственной и профессиональной политики. **Методы:** в ходе исследования применялись методы синтеза и систематизации информации, сравнительный и структурно-логический анализ для оценки институциональных аспектов функционирования саморегулируемой организации и кадровой динамики. **Результаты:** исследования зафиксировали ряд устойчивых негативных тенденций на российском рынке аудита, в том числе кадровый дефицит, институциональный дисбаланс в деятельности единой саморегулируемой организации, а также ценовой демпинг и формирование спроса на формальный аудит. **Практическая значимость:** выявление ключевых проблем рынка и разработка на этой основе предложений по их решению. Сформулированные рекомендации могут быть использованы для повышения качества аудиторских услуг в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: рынок аудита, нормативное регулирование аудита, государственная политика в сфере аудита, стратегия развития аудиторской профессии

Введение

В условиях глобальных экономических трансформаций, санкционного давления и цифровизации бизнес-процессов исследование современного состояния рынка аудиторских услуг в России приобретает особую актуальность. В последние годы российский аудиторский рынок претерпел значительные структурные изменения, связанные с уходом международных компаний «большой четверки», ужесточением регуляторных требований со стороны Банка России и Федерального казначейства, а также переориентацией на импортозамещение программного обеспечения и методологии аудита [1].

Целью данной работы является анализ текущего состояния российского рынка аудиторских услуг, выявление системных проблем его развития и определение перспективных направлений государственной и профессиональной политики в этой сфере.

Материалы и методы исследования

Исследованию проблем и перспектив развития аудиторского рынка в современных условиях посвящены труды многих отечественных ученых — А. Д. Шеремета, В. Т. Чая, М. В. Мельник, Р. П. Булыги, С. М. Бычковой, Н. С. Пласковой, И. Н. Богатой, М. Ф. Сафоновой, Н. А. Казаковой. В частности, в данной работе теоретической базой послужили некоторые исследования вышеназванных ученых, а также работы других авторов из Финансового университета при Правительстве РФ, РЭУ имени Плеханова, Воронежского государственного университета и др.

Нормативную базу исследования составили федеральные законы, подзаконные акты, а также профессиональные стандарты. Методической основой работы выступили статистические данные Министерства финансов РФ, аналитические материалы Единой аттестационной комиссии, а также публикации в профессиональных изданиях и дискуссии на профильных интернет-порталах.

В работе применялись методы анализа и синтеза, систематизации, сравнения и структурно-логического анализа для выявления основных тенденций и проблем развития отрасли.

Результаты исследования

Аудиторские услуги — деятельность по проведению аудита и оказанию сопутствующих аудиту услуг, осуществляемая аудиторскими организациями, индивидуальными аудиторами [2]. Они включают аудит бухгалтерской (финансовой) отчетности, в том числе консолидированной финансовой отчетности (ее части), отчетности (части отчетности), которая содержит финансовую информацию, систематизированную по специальным правилам, иной финансовой информации и прочие соответствующие услуги.

Система нормативного регулирования аудиторской деятельности в Российской Федерации имеет иерархическую структуру, представленную на рис. 1.

Фундаментом выступает законодательный уровень, включающий Конституцию РФ, Гражданский кодекс РФ, а также ключевые профильные законы: № 307-ФЗ «Об аудиторской деятельности», № 115-ФЗ «О противодействии легализации (отмыванию) доходов...» и № 273-ФЗ «О противодействии коррупции».

Второй уровень образуют подзаконные акты: постановления и распоряжения Правительства РФ, приказы Минфина России. Отдельно в данной группе выделены нормативные акты Банка России (указания, положения, инструкции), регулирующие аудит организаций финансового сектора.

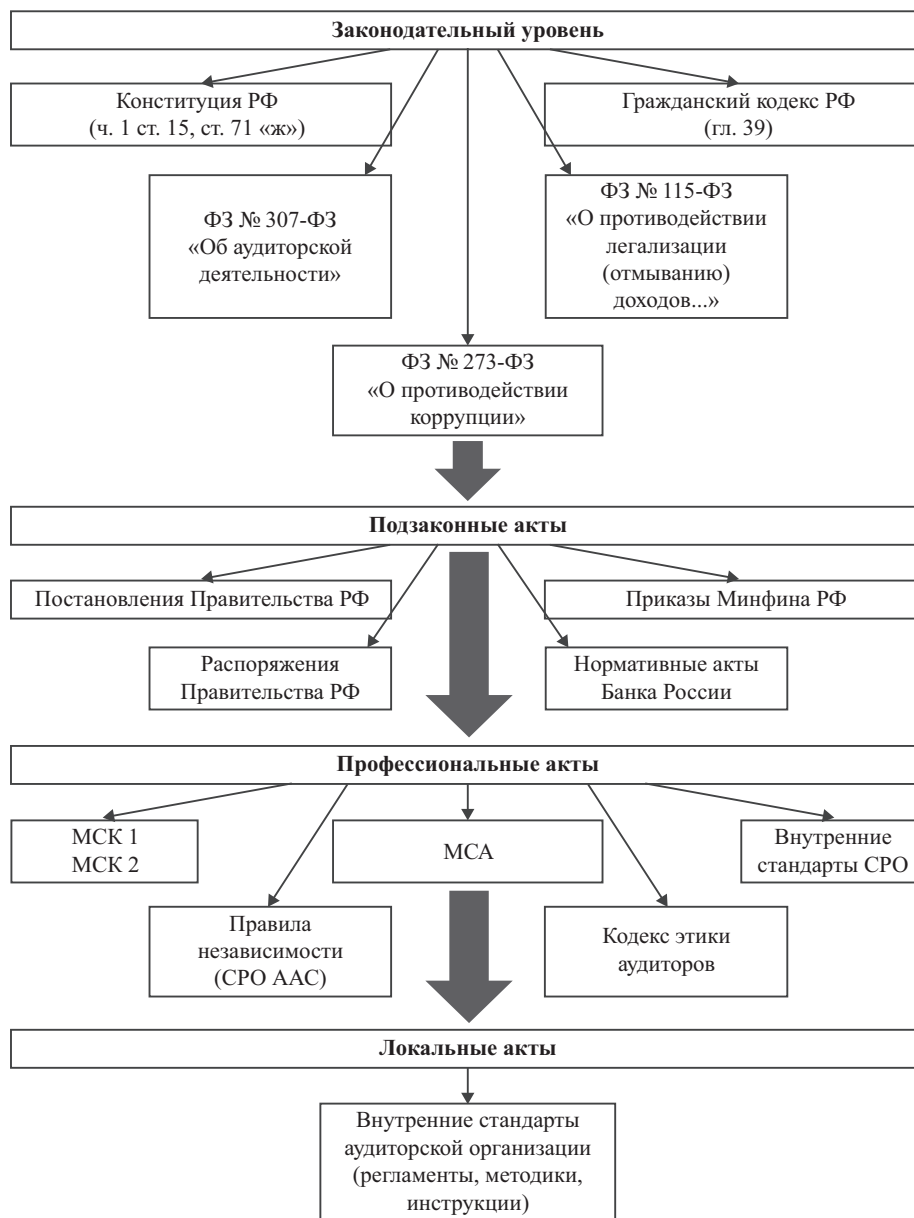


Рис. 1. Уровни законодательного регулирования аудиторской деятельности в РФ (составлено авторами)

Третий уровень составляют профессиональные акты: Международные стандарты аудита (МСА), Стандарты контроля качества, Кодекс этики аудиторов, правила независимости, а также стандарты саморегулируемых организаций (СРО). Завершает иерархию уровень локальных актов — внутренние стандарты, регламенты и методики конкретных аудиторских организаций.

Однако текущая нормативная база по ряду вопросов не успевает за технологическими и экономическими изменениями. К примеру, статус удаленных процедур и методов дистанционного аудита до сих пор не закреплен законодательно, из-за чего возникают риски оспаривания результатов проверок, полученных в ходе дистанционных взаимодействий с клиентом [3, с. 4].

Согласно данным Министерства финансов РФ, в 2022–2025 годах продолжилась тенденция сокращения числа участников аудиторского рынка, что продемонстрировано на рис. 2.

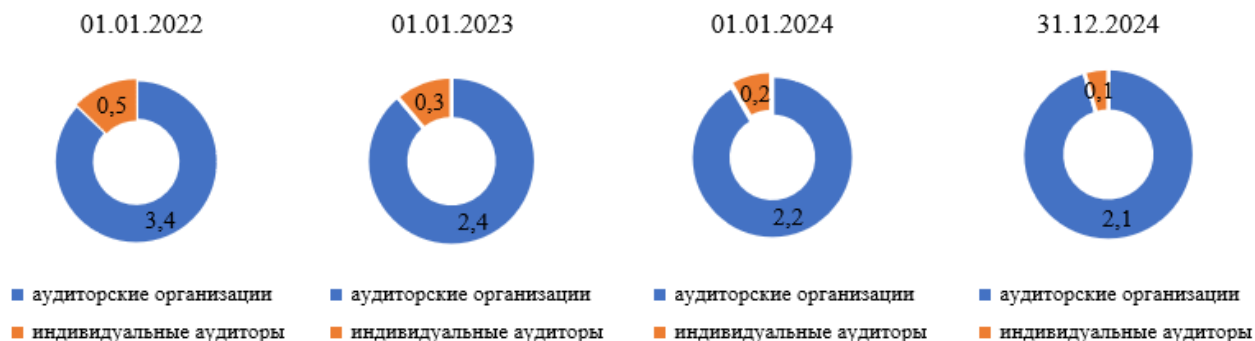


Рис. 2. Динамика количества аудиторских организаций и индивидуальных аудиторов в Российской Федерации (составлено авторами на основе [4])

Критически важным является дисбаланс между общим числом аудиторов и количеством специалистов, имеющих единый квалификационный аттестат (рис. 3). На конец 2024 года лишь 27,8% аудиторов (4,2 тыс. из 15,1 тыс.) соответствовали требованиям Федерального закона № 307-ФЗ о наличии единого аттестата [1]. Данная ситуация формирует риски для экономики, связанные с качеством аудиторских услуг.



Рис. 3. Соотношение общего числа аудиторов и аудиторов с аттестатом (составлено авторами на основе [4])

Нисходящая динамика объема на рынке аудиторских услуг демонстрируется и в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Изменение объема оказанных услуг по сравнению с прошлым годом, % [4]

	2022	2023	2024
Аудиторские организации	–5,8	–7,2	4,6
Аудиторские организации без крупнейших АО	–5,1	3,7	6,7
Индивидуальные аудиторы	–35,3	–8,3	9,3
Объем доходов от аудита аудиторских организаций, приходящийся на 1 млн руб. выручки клиентов, руб.	230	209	206
Всего	–6,3	–7,2	4,6

Более глубокие проблемы связаны еще и с аудиторскими кадрами, условиями их работы и институциональной средой, в которой они вынуждены функционировать.

Анализ статистики сдачи предыдущих этапов квалификационного экзамена, проводимого Единой аттестационной комиссией, демонстрирует проблемы на всех уровнях проверки знаний. С 2020 по 2024 год первый этап экзамена сдавали 15 867 человек, но успешно преодолели его лишь 8916 (56,2 %) [5]. Это означает, что почти половина претендентов (43,8 %) отсеивается уже на начальной стадии тестирования. Второй этап за тот же период сдавали 8027 человек, а сдали только 3247 (40,5 %). Совокупный отсев на первых двух этапах превышает 80 % от первоначального числа кандидатов. В результате до финального, третьего, этапа доходят единицы: за 2021–2024 годы его сдавали 242 человека, а успешно завершил испытание 161 кандидат. Таким образом, из 15 867 кандидатов, пришедших на первый этап экзамена в 2020–2024 годах, до получения заветного аттестата дошел примерно 161 человек. Это 1 % от начального числа. Данная статистика в сочетании с массовым выбыванием действующих специалистов (около 4000 человек за тот же период) формирует критический кадровый дефицит.

Анализ структуры сдачи второго этапа экзамена за 2021–2024 годы показывает, что наибольшие сложности у кандидатов вызывают дисциплины, непосредственно связанные с компетенциями аудитора. Средний показатель сдачи по разделу «Аудит» за указанный период составил всего 38,03 %, а по разделу «Бухгалтерский учет» — 34,68 %. Возникает парадоксальная ситуация, когда большинство претендентов на получение статуса аудитора не могут сдать профильные экзамены — по учету и аудиту.

Ситуация усугубляется критической возрастной структурой кадров. В настоящее время средний возраст аудитора в России превышает 50 лет [6]. Это означает, что в ближайшее десятилетие отрасль может столкнуться с массовым выбытием кадров, которое нечем будет компенсировать. Данные профессионального дискурса дополняют эту картину: в профессиональных сообществах 67% участников рассматривают уход из профессии в ближайшие два года, ссылаясь на регуляторное давление (34%), финансовую нерентабельность (29%) и эмоциональное выгорание (22%) [1].

Одним из ключевых факторов, провоцирующих разочарование в профессии, выступает сложившаяся модель саморегулирования. С 2022 года в России функционирует одна единая саморегулируемая организация аудиторов «Содружество» (СРО ААС), объединяющая 2016 аудиторских организаций и 14 703 аудитора [7]. Формально СРО призвана обеспечивать профессиональное развитие сообщества, защищать интересы своих членов и контролировать качество аудиторских услуг. Тем не менее существует институциональный кризис сложившейся модели.

Исследование коммуникаций на портале audit-it.ru выявило, что 78% участников профессиональных дискуссий критически оценивают деятельность СРО. В профессиональном сообществе доминирует восприятие его не как поддерживающего института, а как органа, ориентированного преимущественно на фиксацию нарушений. По оценкам участников дискуссий, около 65% ресурсов СРО направлено на проведение внешнего контроля деятельности, тогда как функции методической поддержки и защиты интересов профессии остаются на периферии [1, с. 8].

Статистика исключений из реестра СРО подтверждает этот дисбаланс. За 2022–2024 годы число организаций сократилось на 18%. При этом 92% случаев были связаны с формальными нарушениями процедур внешнего контроля (непредоставление документов, нарушение сроков и т. п.), а не с профессиональными ошибками или фактами недобросовестного аудита [1, с. 9].

По заявлению генерального директора СРО ААС, за 2024 год 30 аудиторских организаций были исключены из реестра за уклонение от прохождения контроля, а еще 90 компаний добровольно прекратили членство после включения в план проверок [7]. С одной стороны, это свидетельствует об эффективности контрольных механизмов. С другой — возникает вопрос: почему организации предпочитают уход с рынка вместо прохождения проверок? Возможно, такая ситуация складывается, поскольку административная нагрузка и риски непропорционально высоки. Сложившаяся модель саморегулирования способствует не очищению рынка от недобросовестных участников, а выдавливанию малых и средних организаций, которые не имеют ресурсов для прохождения контрольных процедур. Они вынуждены покидать рынок, даже если качество услуг соответствует требованиям. При этом одна из важнейших задач саморегулирования — повышение качества аудиторских услуг — подменяется формальным контролем соблюдения процедур.

В результате рынок теряет не только недобросовестных участников, но и добросовестные небольшие компании.

Помимо институциональных трудностей, серьезным вызовом для российского аудиторского рынка является тенденция к ценовому демпингу и формированию спроса на номинальный аудит. Возвращаясь к данным табл. 1, можно отметить постепенное снижение удельной стоимости аудиторских услуг: объем доходов от аудита в расчете на 1 млн руб. выручки клиентов сократился с 230 руб. в 2022 году до 206 руб. в 2024 году.

Эксперты рынка указывают на причины этой динамики. Отмечается, что значительная часть компаний, подлежащих обязательному аудиту, не заинтересована в проведении реальной проверки. Руководство таких компаний формирует спрос на максимально дешевый формальный аудит, и на рынке появляются аудиторы, готовые этот спрос удовлетворить.

Данный процесс имеет и экономическое обоснование. Основной спрос на услуги аудиторов сегодня исходит от участников финансового и фондового рынков. Для остального же бизнеса обязательный аудит является дополнительной нагрузкой, которую стремятся минимизировать за счет снижения стоимости. В такой ситуации ценовой критерий становится определяющим при выборе исполнителя, что неизбежно ведет к снижению качества предоставляемых услуг.

Примечательно, что при формальном наличии в законодательстве механизмов противодействия недобросовестной конкуренции реальная практика выявления таких нарушений остается крайне ограниченной. Как отмечено в одном из исследований, в ходе внешнего контроля СРО ААС было выявлено лишь три случая признаков недобросовестной конкуренции из 7563 проверок, что составляет 0,05% [8, с. 5]. Этот парадокс свидетельствует либо о недостаточной эффективности контрольных процедур, либо об их формальном характере, не позволяющем выявлять содержательные нарушения.

Накопленные проблемы требуют системного ответа со стороны государства. В 2024 году Правительство РФ утвердило Основные направления государственной политики в сфере бухгалтерского учета, финансовой отчетности и аудиторской деятельности до 2030 года (распоряжение от 22.11.2024 № 3386-р), а в феврале 2025 года Минфин России утвердил План мероприятий по их реализации [9, 10].

Изучение документа позволяет выделить ключевые приоритеты государственного регулирования аудиторской отрасли на ближайшие пять лет (табл. 2).

Параллельно с государственным планированием СРО «Содружество» разработала собственную Стратегию развития аудиторской профессии до 2030 года. Данный документ представляет взгляд на проблемы отрасли изнутри и содержит более жесткие оценки ситуации. В нем констатируется: «Кадровая ситуация в аудиторской отрасли не просто близка к критической, а имеет место экзистенциальная угроза для аудиторской профессии в Российской Федерации» [11, с. 6].

В Стратегии приводятся тревожные цифры об уровне оплаты труда: «Среднемесячная заработная плата одного сотрудника по итогам 2024 года составила 21 тыс. рублей в Южном округе, 21,3 тыс. рублей в Сибирско-Дальневосточном округе» [11, с. 7]. Эти данные полностью коррелируют с выводом настоящего исследования о нерентабельности профессии как одной из причин оттока кадров.

ТАБЛИЦА 2. Основные мероприятия Плана Минфина России в сфере аудита

Мероприятие	Срок исполнения	Ожидаемый эффект
Устранение дублирующих контрольных мероприятий в сфере противодействия легализации (отмыванию) доходов	2026	Снижение административной нагрузки на аудиторов
Пересмотр перечня общественно значимых организаций	2027	Расширение круга организаций, подлежащих особому контролю
Совершенствование конкурсных процедур отбора аудиторов	2028	Борьба с ценовым демпингом
Усиление ответственности за грубые нарушения	2029	Повышение качества аудита
Признание МСА для применения в РФ	2025–2029	Сохранение связи с международными стандартами

Примечание: составлено авторами на основе [10].

Важным практическим шагом, направленным на формирование у заказчиков понимания реальной стоимости аудиторских услуг, стала разработка СРО ААС Рекомендаций по выбору аудиторской организации для проведения аудита от 27 июня 2025 года. Этот документ впервые публично раскрывает минимальные трудозатраты на проведение аудита и рекомендованные часовые ставки. Согласно расчетам СРО, даже для аудита организации с единственной операцией в отчетном году аудиторская организация должна потратить не менее 40 человеко-часов. Исходя из этого СРО рекомендует справедливую часовую ставку аудитора на уровне 3400 руб./ч (без учета НДС).

Если сопоставить рекомендованную ставку с фактическим объемом доходов от аудита (206 руб. на 1 млн руб. выручки клиентов в 2024 году, табл. 1), становится очевидным масштаб недофинансирования аудиторских услуг. При средней трудоемкости аудита компании с выручкой 1 млн руб. на уровне 40 часов справедливая стоимость аудита должна составлять около 136 тыс. руб., что в 660 раз превышает фактический показатель. Полученный результат еще раз демонстрирует ценовой демпинг на рынке и объясняет, почему качественный аудит в текущих условиях экономически невозможен для подавляющего большинства заказчиков.

Обсуждение

Проведенный анализ позволил выявить проблемы российского рынка аудиторских услуг: критический кадровый дефицит, институциональный дисбаланс в деятельности СРО, устойчивый ценовой демпинг и пр. После подробного их рассмотрения можно предложить следующие решения.

Наиболее эффективные способы решения кадрового дефицита — это пересмотр содержания экзамена с акцентом на практические компетенции и введение системы наставничества для молодых специалистов.

Низкий уровень профильной подготовки кандидатов требует изменения образовательных стандартов и введения обязательной стажировки перед допуском к экзамену.

Проблему низкой оплаты труда могут решить законодательное закрепление минимальных ценовых индикаторов при обязательном аудите и расширение практики применения рекомендованных СРО часовых ставок.

Для преодоления институционального кризиса СРО достаточными мерами станут перераспределение ресурсов с контроля на методическую поддержку и введение дифференцированного подхода к проверкам в зависимости от репутации организации.

Избежать ценового демпинга и спроса на аудит для галочки можно за счет введения условий, когда клиенту экономически невыгодно выбирать дешевого аудитора, а аудитору — рисковать репутацией ради выгоды. Это достигается через публичность критериев и введение второго, независимого контролера.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о кризисе на российском рынке аудиторских услуг, проявляющемся в трех взаимосвязанных аспектах: кадровом, институциональном и экономическом.

Принятые стратегические документы констатируют вышеперечисленные трудности, но предложенные меры носят преимущественно административный характер и не устраняют истинные причины, одна из которых — финансовая несостоятельность качественного аудита в текущей модели рынка. Дальнейшее развитие отрасли требует не точечных корректировок, а пересмотра подходов к регулированию, включая изменение роли СРО, реформу системы аттестации и внедрение экономических механизмов, делающих невыгодными демпинг и формальный аудит.

Список источников

1. Абади М. Т. И. Рынок аудиторских услуг в России: структурные изменения, экономические тенденции и факторы конкурентоспособности // Вестник Челябинского государственного университета. 2025. № 3 (497). С. 109–120. DOI: 10.47475/1994-2796-2025-497-3-109-120

2. Об аудиторской деятельности: федер. закон от 30.12.2008 № 307-ФЗ (ред. от 26.12.2024) // Доступ из СПС «КонсультантПлюс».

3. Пилова Ф.И., Амшокова А.З. Анализ состояния рынка аудиторских услуг в России: тенденции, проблемы, направления развития // Вестник Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета. 2025. С. 230–237. DOI: 10.26456/2219-1453/2025.1.230-237

4. Основные показатели рынка аудиторских услуг в Российской Федерации в 2024 г. // Министерство финансов РФ: официальный сайт. URL: https://minfin.gov.ru/ru/performance/audit/audit_stat/mainindex?id_57=312681-osnovnye_pokazateli_rynka_auditorskikh_uslug_v_rossiiskoi_federatsii_v_2024_g (дата обращения: 23.02.2026).

5. Единая аттестационная комиссия (ЕАК): официальный сайт. URL: https://eak-rus.ru/about/godovaya_otchetnost (дата обращения: 01.03.2026).

6. Ковальчук Е. Большая чистка: почему сокращается рынок аудиторов // Коммерсантъ: сайт. 11.12.2025. URL: kommersant.ru/doc/8232815 (дата обращения: 23.02.2026).

7. Минфин объявил о чистке рынка аудиторов // Юникон: сайт. 30.09.2025. URL: <https://www.unicon.ru/insights/unicon-v-smi/minfin-obyavil-o-chistke-rynka-auditorov/> (дата обращения: 24.02.2026).

8. Романовский В.А. Анализ устойчивого развития рынка аудиторских услуг // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 11, №4. С. 103–109. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.04.11.015

9. Об утверждении основных направлений государственной политики в сфере бухгалтерского учета, финансовой отчетности и аудиторской деятельности до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 22.11.2024 № 3386-р // Правительство России: официальный сайт. URL: <http://government.ru/docs/53431/> (дата обращения: 01.03.2026).

10. Об утверждении Плана мероприятий по реализации основных направлений государственной политики в сфере бухгалтерского учета, финансовой отчетности и аудиторской деятельности до 2030 года: приказ Минфина России от 18.02.2025 № 53 // Гарант: информационно-правовой портал. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/411425879/> (дата обращения: 24.02.2026).

11. Стратегия саморегулируемой организации аудиторов Ассоциации «Содружество» по развитию аудиторской профессии в Российской Федерации до 2030 года (утв. решением Правления СРО ААС от 03.10.2025, протокол № 753 // Саморегулируемая организация аудиторов Ассоциация «Содружество» (СРО ААС): официальный сайт. URL: <https://sroaas.ru/documents/642573/> (дата обращения: 02.03.2026).

Дата поступления: 16.03.2026

Решение о публикации: 15.04.2026

Контактная информация:

САЦУК Татьяна Павловна — доктор экон. наук, профессор; stp@mail.ru

АФАНАСЬЕВА Анастасия Юрьевна — студент; anastasiaafanasieva15@mail.ru

Transformation of Value Attitudes in the Russian Audit Market: Current State and Development Prospects

T. P. Satsuk, A. Yu. Afanas'eva

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Satsuk T. P., Afanas'eva A. Yu. Transformation of Value Attitudes in the Russian Audit Market: Current State and Development Prospects // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 217–228. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-217-228 (In Russian)

Abstract

Purpose: to conduct a comprehensive analysis of the current state of the Russian audit services market in the period 2021–2025, identify systemic problems in its development, and determine promising directions for state and professional policy. **Methods:** the study employed methods of synthesis and systematization of information, as well as comparative and structural-logical analysis to assess the institutional aspects of the functioning of self-regulatory organizations and workforce dynamics. **Results:** research has documented a number of persistent negative trends in the Russian audit market, including staff shortages, institutional imbalances in the activities of a single self-regulatory organization, as well as price dumping and the formation of demand for formal auditing. **Practical significance:** identification of key market problems and development of proposals for their solution on this basis. The recommendations formulated can be used to improve the quality of audit services in the long term.

Keywords: audit market, regulatory framework of audit, state policy in the field of audit, audit profession development strategy

References

1. Abadi M. T. I. Rynok auditorskikh uslug v Rossii: strukturnye izmeneniya, ekonomicheskie tendentsii i faktory konkurentosposobnosti [The Audit Services Market in Russia: Structural Changes, Economic Trends and Factors of Competitiveness], *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Chelyabinsk State University]*, 2025, no. 3 (497), pp. 109–120, DOI: 10.47475/1994-2796-2025-497-3-109-120 (In Russian)
2. Federal'nyj zakon [Federal Law], no. 307-FZ of December 30, 2008 (amended on December 26, 2024) “Ob auditorskoj deyatelnosti” [On Auditing Activity], access from the ConsultantPlus Legal Reference System. URL: consultant.ru/document/cons_doc_LAW_83311/ (accessed: February 25, 2026). (In Russian)
3. Pilova F. I., Amshokova A. Z. Analiz sostoyaniya rynka auditorskikh uslug v Rossii: tendentsii, problemy, napravleniya razvitiya [Analysis of the State of the Audit Services Market in Russia: Trends, Problems, Directions of Development], *Vestnik Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Kabardino-Balkarian State Agricultural University]*, 2025, pp. 230–237. DOI: 10.26456/2219-1453/2025.1.230-237 (In Russian)
4. Osnovnye pokazateli rynka auditorskikh uslug v Rossijskoj Federatsii v 2024 g. [Key Indicators of the Audit Services Market in the Russian Federation in 2024], Ministry of Finance of the Russian Federation. URL: https://minfin.gov.ru/ru/performance/audit/audit_stat/mainindex?id_57=312681-osnovnye_pokazateli_rynka_auditorskikh_uslug_v_rossiiskoi_federatsii_v_2024_g (accessed: February 23, 2026). (In Russian)

5. Edinaya attestatsionnaya komissiya (EAK) [Unified Certification Commission (UCC)], official website, Moscow. URL: https://eak-rus.ru/about/godovaya_otchetnost (accessed: March 01, 2026). (In Russian)

6. Kovalchuk E. Bol'shaya chistka: pochemu sokrashchaetsya rynek auditorov [The Great Purge: Why the Auditor Market is Shrinking], Kommersant: website, December 11, 2025, URL: kommersant.ru/doc/8232815 (accessed: February 23, 2026). (In Russian)

7. Minfin ob"yavil o chistke rynka auditorov [The Ministry of Finance Announces a Purge of the Auditor Market], Unicon: website, September 30, 2025. URL: <https://www.unicon.ru/insights/unicon-v-smi/minfin-obyavil-o-chistke-rynka-auditorov/> (accessed: February 24, 2026). (In Russian)

8. Romanovskij V.A. Analiz ustojchivogo razvitiya rynka auditorskikh uslug [Analysis of Sustainable Development of the Audit Services Market], *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya* [Economics and Management: Problems, Solutions], 2025, no. 4, vol. 11, pp. 103–109. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.04.11.015 (In Russian)

9. Ob utverzhdenii osnovnykh napravlenij gosudarstvennoj politiki v sfere bukhgalterskogo ucheta, finansovoj otchetnosti i auditorskoj deyatel'nosti do 2030 goda [On Approval of the Main Directions of State Policy in the Field of Accounting, Financial Reporting and Auditing Activities until 2030]. Decree of the Government of the Russian Federation no. 3386-r of November 22, 2024. Moscow, Government of Russia: official website. URL: <http://government.ru/docs/53431/> (accessed: March 01, 2026). (In Russian)

10. Ob utverzhdenii plana meropriyatij po realizatsii osnovnykh napravlenij gosudarstvennoj politiki v sfere bukhgalterskogo ucheta, finansovoj otchetnosti i auditorskoj deyatel'nosti do 2030 goda" [On Approval of the Action Plan for the Implementation of the Main Directions of State Policy in the Field of Accounting, Financial Reporting and Auditing Activities until 2030]. Order of the Ministry of Finance of Russia, no. 53 of February 18, 2025. GARANT.RU, Moscow, 2025. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/411425879/> (accessed: February 24, 2026). (In Russian)

11. Strategiya Samoreguliruemoj organizatsii auditorov Assotsiatsii "Sodruzhestvo" po razvitiyu auditorskoj professii v Rossijskoj Federatsii do 2030 goda [Strategy of the Self-Regulatory Organization of Auditors Association "Sodruzhestvo" for the Development of the Audit Profession in the Russian Federation until 2030], approved by the Decision of the Board of the SRO AAS on October 3, 2025, Minutes no. 753. Self-Regulatory Organization of Auditors Association "Sodruzhestvo" (SRO AAS): official website, Moscow. URL: <https://sroaas.ru/documents/642573/> (accessed: March 02, 2026). (In Russian)

Received: March 16, 2026

Accepted: April 15, 2026

Author's information:

Tatiana P. SATSUK — Dr. Sci. in Economics, Professor; stp13@mail.ru

Anastasiya Yu. AFANAS'eva — Student; anastasiaafanasieva15@mail.ru

УДК 658.71:69.003

Анализ современного состояния и перспектив развития конкуренции в сфере закупок в контексте концепции технологического развития России

С. И. Миронов, С. Г. Опарин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Миронов С. И., Опарин С. Г.* Анализ современного состояния и перспектив развития конкуренции в сфере закупок в контексте концепции технологического развития России // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 229–241. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-229-241

Аннотация

Цель: анализ проблемной ситуации и обоснование перспективных направлений развития принципа конкуренции в сфере закупок в условиях новых вызовов технологического развития, неопределенности и риска. **Методы:** анализ нормативного регулирования контрактной системы в сфере закупок, статистический анализ данных и тенденций развития конкурентных способов государственных и корпоративных закупок, критериальный анализ выбора поставщика и конкурентное ценообразование в сфере закупок, прямо ориентированное на создание стоимости и установление цены контракта. **Результаты:** сформулирована проблемная ситуация развития конкуренции в сфере государственных и корпоративных закупок, которая основана на надежности и ответственности участников, добросовестной ценовой и неценовой конкуренции. Обоснованы перспективные направления развития конкуренции на основе результатно-ориентированного подхода, критериального анализа и конкурентного ценообразования в условиях неопределенности и риска. **Практическая значимость:** в целях развития принципа конкуренции в сфере закупок обоснована необходимость развития критериального анализа и критериев оценки заявок участников закупки, совершенствования механизма выбора поставщика на основе риск-ориентированного подхода, развития метода конкурентного ценообразования с учетом цены риска потребности в дополнительном финансировании, обоснования предложений по развитию контрактной системы в сфере государственных и корпоративных закупок на основе принципа конкуренции и ее адаптации к новым вызовам технологического развития.

Ключевые слова: вызовы технологического развития, государственные закупки, корпоративные закупки, контрактная система, принцип конкуренции, критериальный анализ, результатно-ориентированный подход, контрактный риск, конкурентное ценообразование

Введение

Концепция технологического развития России на период до 2030 года [1] ориентирована на создание конкурентоспособной высокотехнологичной продукции, обеспечение технологического суверенитета и базируется на принципах, которые позволяют принимать управленческие решения в условиях новых вызовов технологического развития, высокой неопределенности и риска:

- принцип разумной конкуренции: поощрение конкуренции, конкурирующих технологических решений и предприятий, а также необходимость поддержки конкурентных процедур;

- принцип экономической целесообразности технологических разработок: сочетание экономичности, экономической эффективности и результативности как степени достижения целей;

- принцип признания права на риск, допускающий возможность недостижения запланированных результатов и эффектов с высоким уровнем риска при условии отсутствия умысла в таком недостижении.

Новые вызовы технологического развития — это совокупность проблем, угроз и возможностей в области разработки и внедрения технологий, сложность и масштаб которых не позволяют их решить, устранить или реализовать исключительно за счет увеличения используемых ресурсов. Такие вызовы создают риски для экономики и системы государственного управления, но одновременно открывают новые перспективы технологического развития и инновационно ориентированного экономического роста.

Указанную особенность необходимо учитывать при выборе устойчивых (надежных) поставщиков [1] в системе государственных и корпоративных закупок товаров, работ, услуг, в том числе в целях реализации национальных и региональных проектов.

В текущих условиях экономического развития вопросы состояния конкуренции приобретают все большее, если не ключевое значение [2]. При этом технологические вызовы ставят новые цели и задачи по совершенствованию правовых и организационных мер обеспечения, защиты и развития конкуренции.

Государственные и корпоративные закупки, регулируемые контрактной системой [3, 4], являются важнейшим инструментом государственного управления и одним из ключевых индикаторов состояния конкурентной среды в экономике России. Контрактная система прямо ориентирована на создание равных условий для конкуренции и выявление лучших условий поставки товаров, работ, услуг. Законодательно институциональные условия для конкуренции созданы: закон уравнивает участников закупок в правах и предполагает использование в большинстве случаев конкурентных способов закупки. Несмотря на введение принципа конкуренции и постоянное совершенствование правовой нормативной базы в сфере закупок, все более очевидным становится тот факт, что потенциал контрактной системы в развитии конкуренции далеко не раскрыт.

По результатам ежегодного аудита Счетной палаты РФ [5], система государственных и корпоративных закупок по-прежнему характеризуется низкой конкуренцией и высоким уровнем несостоявшихся закупок, преобладанием неконкурентных способов закупок, неурегулированностью в вопросах нормирования закупок, значительными нарушениями при определении начальной (максимальной) цены контракта (НМЦК). Сохраняется устойчивая тенденция осуществления закупок по минимальным ценам, что сдерживает развитие конкурентного ценообразования и часто делает невозможным выбор надежного поставщика качественных товаров, работ, услуг.

Целью исследования является анализ проблемной ситуации и обоснование перспективных направлений развития принципа конкуренции в сфере закупок в условиях новых вызовов технологического развития, неопределенности и риска.

Материалы и методы

При проведении исследования выполнен анализ нормативного регулирования контрактной системы в сфере закупок, статистический анализ данных, методов определения НМЦК и цены контракта, заключаемого с единственным поставщиком. С этой целью использованы данные, приведенные в Сводных аналитических отчетах Минфина РФ о результатах мониторинга закупок за 2021–2024 годы [6], а также сведения Федеральной антимонопольной службы [7, 8] и Счетной палаты [5, 9].

Существенное внимание уделено тенденциям развития конкуренции в сфере государственных и корпоративных закупок [11, 13, 14], критериальному анализу и критериям выбора поставщика [15], перспективам развития конкурентного ценообразования в сфере закупок [10, 12, 16], прямо ориентированного на создание стоимости товаров, работ, услуг и установление цены контракта.

На рисунке для примера приведена укрупненная блок-схема существующей процедуры определения поставщика и установления цены контракта при конкурентных способах государственных закупок, которая отражает сложный процесс нормирования закупки, выбора ценовых и неценовых критериев и рейтинговой оценки заявок участников закупки, определения поставщика, предложившего лучшие условия поставки товаров, выполнения работ, оказания услуг, включая предложение по качеству и цене закупки.

Под нормированием в сфере закупок понимается установление требований к закупаемым товарам, работам, услугам, в том числе требований предельной цены (НМЦК), а также требований по количеству, потребительским свойствам, качественным и иным характеристикам товаров, работ, услуг. При этом предъявляемые требования не должны приводить к закупкам товаров, работ, услуг, которые имеют избыточные потребительские свойства.

Важное значение при определении цены контракта приобретает выбор способа закупки, который прямо влияет на уровень конкуренции и установление конкурентной (в пределах установленных ограничений и возможностей) цены контракта.

На рисунке видно, что при проведении конкурса цена контракта C^* принимается равной цене предложения участника закупки C_j , который предложил лучшие условия исполнения контракта: $C^* = C_j$, где j — номер заявки победителя конкурса.

В случае аукциона и запроса котировок цена контракта C^* устанавливается по цене участника закупки — победителя аукциона (запроса котировок), который при условии соответствия заявки установленным требованиям предложил наиболее низкую цену: $C^* = \min\{C_j\}$, $j = 1, \dots, n$, где n — число участников закупки.

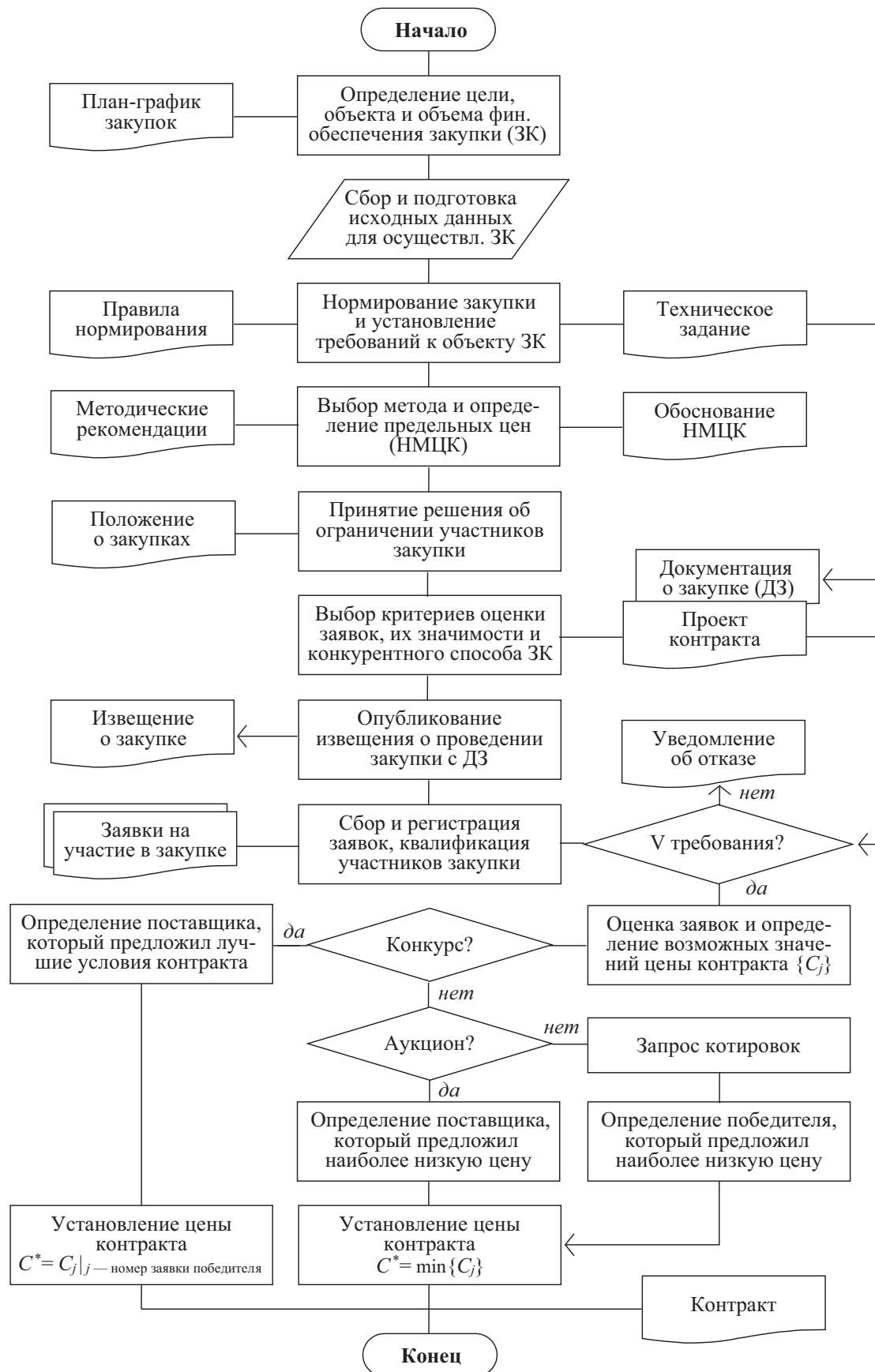


Рисунок. Укрупненная блок-схема процедуры ценообразования в сфере государственных закупок на основе принципа конкуренции

Систематизированы специфические особенности и нормативное регулирование закупок на выполнение работ по строительству, реконструкции и капитальному ремонту — одному из наиболее капиталоемких и стратегически значимых сегментов закупок, в котором аккумулируется значительный объем бюджетных средств.

Результаты исследования

Проблемная ситуация развития конкуренции в сфере государственных и корпоративных закупок обусловлена комплексом факторов, которые ограничивают или препятствуют формированию и поддержанию здоровой конкурентной среды, основанной на надежности и ответственности участников, добросовестной ценовой и неценовой конкуренции.

В табл. 1 и 2 приведены данные, отражающие динамику основных показателей государственных закупок (44-ФЗ) и корпоративных закупок (223-ФЗ) соответственно. Анализ полученных данных свидетельствует о сохранении высокой интенсивности закупочной деятельности в России при одновременном ограничении конкуренции между участниками закупок.

ТАБЛИЦА 1. Динамика основных показателей государственных закупок по 44-ФЗ за 2021–2024 годы (составлена авторами на основе данных [6])

Показатель	Год			
	2021	2022	2023	2024
Опубликовано извещений о закупках, шт.	2 358 561	2 296 597	2 422 883	2 606 863
Стоимостной объем закупок, млрд руб.	10 352,0	10 836,4	10 613,7	11 981,8
Доля несостоявшихся процедур, % (кол-во / стоимостной объем)	52,3 / 57,9	50,7 / 61,6	50,7 / 60,4	56,7 / 64,3
Расторгнутые контракты в отчетном периоде (шт. / млрд руб.)	805 800 / 2 273,8	791 273 / 2 267,0	849 727 / 2 506,0	901 738 / 2 974,6
Доля сегмента строительных закупок, % (кол-во / стоимостной объем)	4,8 / 39,8	4,7 / 44,0	4,4 / 40,2	4,4 / 39,0
Среднее кол-во заявок в строительных закупках, шт. (поданных/допущенных)	2,8 / 2,8	2,4 / 2,3	2,7 / 2,6	2,3 / 2,2
Доля несостоявшихся конкурентных процедур в строительстве, % (кол-во / стоимостной объем)	61,0 / 60,8	57,4 / 61,1	51,4 / 57,5	56,6 / 60,1
Доля расторгнутых контрактов в строительстве, заключенных в отчетном периоде, % (кол-во / стоимостной объем)	14,2 / 5,9	13,6 / 5,0	13,8 / 6,2	14,3 / 6,5

Так, в сфере государственных закупок (табл. 1) ежегодно размещается около 2,3–2,6 млн извещений при совокупном стоимостном объеме закупок порядка 10–12 трлн руб. Вместе с тем доля несостоявшихся конкурентных процедур в 2021–2024 годах оставалась крайне высокой: 50–57% по количеству и 58–64% по стоимостному объему. Закупки на строительство, реконструкцию и капитальный ремонт составляют лишь 4,4–4,8% от объема всех закупок, при этом на их долю приходится 39–44% совокупного стоимостного объема закупок. Это свидетельствует о том, что закупки в строительстве являются наиболее емким в стоимостном выражении сегментом контрактной системы, а проблемы конкуренции в строительстве имеют наибольшие экономические последствия. Среднее число заявок на строительные лоты составляло всего 2,3–2,8 на одну закупку, что характеризует низкую интенсивность конкурентного взаимодействия.

ТАБЛИЦА 2. Динамика основных показателей корпоративных закупок по 223-ФЗ за 2021–2024 годы (составлена авторами на основе данных [6])

Показатель	Год			
	2021	2022	2023	2024
Опубликовано извещений о закупках, шт.	1 162 988	1 013 231	1 157 296	1 243 964
Стоимостной объем закупок, млрд руб.	19 333,1	10 076,0	14 003,7	19 247,4
Доля конкурентных способов закупок, % (кол-во / стоимостной объем)	62,4 / 78,9	58,7 / 73,6	55,1 / 54,1	53,5 / 50,2
Доля неконкурентных способов закупок, % (кол-во / стоимостной объем)	37,6 / 21,1	41,3 / 26,4	44,9 / 45,9	46,5 / 49,8
Среднее кол-во заявок, шт. (поданных/ допущенных)	1,8 / 1,6	1,9 / 1,7	1,9 / 1,8	2,0 / 1,7
Доля несостоявшихся процедур, % (кол-во / стоимостной объем)	33,3 / 51,4	31,1 / 36,4	33,4 / 37,9	35,7 / 33,7
Расторгнутые контракты, заключенные в отчетном периоде, шт. / млрд руб.	45 083 / 454,3	53 647 / 194,1	50 979 / 176,2	51 970 / 219,8
Доля закупок в строительстве по ОКПД2*, % (стоимостной объем)	30,86	51,78	16,54	н/д

* Примечание: доля закупок в строительстве рассчитана как отношение суммы стоимостных объемов по крупнейшим строительным кодам ОКПД2 к общему стоимостному объему заключенных договоров по 223-ФЗ.

В сфере корпоративных закупок (табл. 2) доля несостоявшихся конкурентных процедур оказывается более умеренной и составляет 31–36% по количеству и снижается с 51,4% в 2021 году до 34% в 2024-м по стоимостному объему. Вместе с тем наблюдается рост доли неконкурентных способов закупок по стоимости: с 21,1% в 2021 году до 49,8% в 2024-м, что свидетельствует о вытеснении существенных объемов корпоративных закупок из зоны конкурентных процедур. Интенсивность конкуренции в среднем составляет 1,8–2 заявки на закупку, что нередко приводит к фактическому переходу от конкурентного способа закупки к заключению контракта с единственным поставщиком.

Анализ сведений, открыто публикуемых контрольными органами, дополнительно отражает в целом неблагоприятную ситуацию формирования конкурентной среды в сфере закупок. В частности, в 2024 году ФАС России рассмотрела более 31,8 тыс. обращений и жалоб по существу, из которых 39,8% признаны обоснованными [7]. Существенный объем нарушений фиксируется в сфере закупок для строительства. ФАС России отмечает, что решение о закупке у единственного поставщика допустимо только в исключительных случаях, когда проведение конкурентной процедуры невозможно [8]. Однако на практике значительная часть закупок фактически сводится к закупкам у единственного поставщика вследствие проблем с формированием экономически обоснованной цены и надежностью участников закупки.

Таким образом, проблемная ситуация развития конкуренции в сфере государственных и корпоративных закупок заключается в сдерживании формирования и поддержания здоровой конкурентной среды и ее несоответствии новым вызовам технологического развития России. Указанная проблемная ситуация неизбежно приводит к снижению доверия к контрактной системе и активности участников закупок, высокому уровню несостоявшихся процедур, вытеснению значимых по стоимости закупок в неконкурентный сегмент, существенным контрактным рискам и неэффективности значительного объема государственных и корпоративных закупок. В силу целого ряда причин, в частности укрупнения и централизации закупок либо некорректного обоснования НМЦК, нередко возникает потребность в дополнительном финансировании поставок по контракту.

На основе проведенного системного анализа проблемной ситуации выделены четыре группы факторов, сдерживающих развитие конкуренции в сфере закупок в условиях новых вызовов, неопределенности и риска.

1. Ценовая редукция конкуренции. В действующей практике конкуренция во многом сводится к сопоставлению ценовых предложений участников закупки в рамках НМЦК. Для сложных технологических проектов экономически необоснованная низкая цена не является признаком эффективности, а напротив, может свидетельствовать о высоких рисках неисполнения обязательств, ухудшения качества или последующего пересмотра условий контракта. Формальная

экономия средств на стадии закупки не тождественна созданию стоимости для заказчика. Действующие антидемпинговые меры, выражающиеся в требовании повышенного обеспечения контракта, носят преимущественно процедурный характер и не обеспечивают полноценной оценки реальной способности участника исполнить контракт.

2. Кризис сопоставимости и сравнимости предложений. В условиях закупки сложной и уникальной продукции (товаров, работ, услуг) возрастает значимость неценовых критериев, которые оказываются недостаточно чувствительными по отношению к их новым качествам. Неценовые критерии нередко используются формально: их вес в итоговой оценке оказывается незначительным либо они подменяются набором документов, наличие которых не всегда коррелирует с фактической компетентностью и производственными возможностями участника. В результате конкурентная процедура утрачивает функцию выбора действительно лучшего предложения, а система критериев не позволяет выявлять надежность и (или) превосходство поставщика применительно к сложным, капиталоемким проектам.

3. Институциональное безразличие к риску. Действующая конкурентная среда не учитывает допустимый уровень контрактного риска и не контролирует его превышение. Это формирует модель поведения со стороны заказчиков, при которой приоритет отдается процедурной безупречности в ущерб эффективности и качеству конечного результата с учетом риска. В таких условиях заказчик мотивирован проектировать процедуру прежде всего с точки зрения минимизации претензий со стороны контрольных органов, а не с позиции выбора надежного поставщика, способного наилучшим образом реализовать проект в условиях неопределенности и риска.

4. Разрыв между процедурой закупки и целями проекта. В существующей системе цель закупки локализована до приобретения товаров, работ, услуг с заданными характеристиками в пределах НМЦК. Однако цель инвестиционного проекта, частью которого является закупка, существенно шире: это создание продукта, функционирующего объекта, достижение социально-экономического эффекта, оптимизация цены жизненного цикла проекта и обеспечение надежности результата. В настоящее время в плановых документах закупок конечная результативность с целевыми показателями эффективности закупки не фиксируется, в связи с чем возникает разрыв между юридически корректно проведенной процедурой и фактическим достижением стратегической цели заказчика. Конкурентные процедуры, ориентированные только на локальные цели (закупить определенный объем работ по минимальной цене), не гарантируют ценности результата для заказчика.

Выявленные тенденции и факторы, сдерживающие развитие конкуренции в сфере закупок, тесно взаимосвязаны и образуют систему препятствий для повышения эффективности системы закупок в контексте концепции технологического развития России.

Заключение

Результаты проведенного исследования свидетельствуют прежде всего о том, что в развитии конкуренции потенциал существующей контрактной системы в сфере закупок далеко не исчерпан. Она не отвечает новым вызовам технологического развития России и нуждается в системном развитии в условиях беспрецедентной рискованной напряженности в экономике и управлении.

В дополнение к известным и опубликованным в открытых источниках подходам достаточно обоснованными и новыми направлениями развития принципа конкуренции в сфере государственных и корпоративных закупок следует считать:

1. Развитие методологии и методического обеспечения организации государственных и корпоративных закупок на основе результатно-ориентированного подхода, прямо направленного на достижение цели и результатов реализуемых проектов и процессов, в интересах которых осуществляется закупка, а не на формальное соблюдение закупочных процедур.

2. Совершенствование критериального анализа условий и показателей оценки заявок участников закупки, обеспечивающих допуск к процедуре закупки квалифицированных участников по критериям пригодности (квалификации) и выбор надежного поставщика, способного поставлять продукты и услуги в соответствии с требованиями и предложившего лучшие с точки зрения принятых критериев ценового и неценового превосходства условия исполнения контракта.

3. Разработка механизма выбора поставщика на основе признания права на риск и риск-ориентированного подхода, предусматривающего интеграцию управления контрактным риском с процессами стратегического планирования и нормирования закупки, создания стоимости закупаемых товаров, работ, услуг, обеспечения результативности и эффективности закупки с учетом контрактного риска.

4. Развитие метода конкурентного ценообразования в сфере государственных и корпоративных закупок с учетом надежности поставщика и цены риска потребности в дополнительном финансировании работ по контракту.

Реализация указанных направлений развития конкуренции в сфере закупок будет способствовать, на наш взгляд, быстрой и более полной адаптации контрактной системы к новым вызовам технологического развития и превращению контрактной системы в инструмент продвижения инноваций и обеспечения технологического суверенитета России в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

Список источников

1. Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 20.05.2023 № 1315-р. URL: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/80349.html> (дата обращения: 30.03.2026).

2. Стратегия развития конкуренции и антимонопольного регулирования в Российской Федерации на период до 2030 года (утв. протоколом Президиума ФАС России от 03.07.2019 № 6). URL: <https://fas.gov.ru/documents/685792> (дата обращения: 30.03.2026).

3. О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд: федер. закон РФ от 05.04.2013 №44-ФЗ (ред. от 28.12.2025).
4. О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц: федер. закон РФ от 18.07.2011 № 223-ФЗ (ред. от 08.08.2024).
5. Отчет о результатах экспертно-аналитического мероприятия «Анализ возможных причин признания закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд несостоявшимися» (утв. Коллегией Счетной палаты РФ 26.09.2024) / Счетная палата РФ. М., 2024. 42 с.
6. Сводные аналитические отчеты о результатах мониторинга закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд, а также закупок товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц за 2021–2024 гг. // Минфин РФ. URL: <https://minfin.gov.ru/ru/performance/contracts/purchases> (дата обращения: 30.03.2026).
7. ФАС рассмотрела более 39 тысяч жалоб от участников закупок в 2024 году: новость от 24.01.2025 // Федеральная антимонопольная служба. URL: <https://fas.gov.ru/news/33751> (дата обращения: 30.03.2026).
8. ФАС: закупка у единственного поставщика должна быть обоснована и проводиться в исключительных случаях // Федеральная антимонопольная служба. URL: <https://fas.gov.ru/news/33423> (дата обращения: 30.03.2026).
9. Анализ высокой доли несостоявшихся конкурентных процедур (торгов) в контрактной системе: аналитическая записка / П. Тихомиров [и др.]. М., 2022. 23 с.
10. Анчишкина О. В. Особенности ценообразования в закупках // Госзаказ: управление, размещение, обеспечение. 2015. №42. С. 54–61.
11. Пантелеева М. С., Булина А. Р., Якубович А. М. Конкуренция в сфере крупных строительных лотов при проведении подрядных торгов // Московский экономический журнал. 2021. №6. С. 389–398.
12. Кочергин А. В. Развитие методов ценообразования в государственных закупках // Инновации и инвестиции. 2018. №2. С. 254–256.
13. Белозор Ф. И. Закупки для государственных нужд: гармонизация добросовестной конкуренции и экономической эффективности // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. 2021. №1. С. 93–101.
14. Гурьева С. Р. Обеспечение конкуренции при заключении государственных контрактов // Вестник Российской правовой академии. 2023. №3. С. 136–146.
15. Опарин С. Г., Щербакова М. А. Новая цифровая визуализация управления контрактным риском в сфере закупок // Управление рисками: проблемы и решения (РИСК'Э-2022): труды науч.-практ. конф. с зарубеж. участием / под ред. С. Г. Опарина. СПб.: Политех-Пресс, 2023. С. 231–243.
16. Миронов С. И. Предельные цены в сфере закупок и их определение на основе риск-ориентированного подхода // Управление рисками: новые вызовы, проблемы и решения (РИСК'Э-2024): труды науч.-практ. конф. с зарубеж. участием / под науч. ред. С. Г. Опарина. СПб.: Политех-Пресс, 2025. С. 72–78.

Дата поступления: 07.04.2026

Решение о публикации: 24.05.2026

Контактная информация:

МИРОНОВ Сергей Игоревич — аспирант; serzh-mironov-000@mail.ru

ОПАРИН Сергей Геннадиевич — доктор техн. наук, профессор; oparinsg@mail.ru

Analysis of the Current State and Prospects for the Development of Competition in the Field of Procurement in the Context of the Concept of Technological Development of Russia

S. I. Mironov, S. G. Oparin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Mironov S. I., Oparin S. G.* Analysis of the Current State and Prospects for the Development of Competition in the Field of Procurement in the Context of the Concept of Technological Development of Russia // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 229–241. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-229-241 (In Russian)

Abstract

Objective: analysis of the problem situation and substantiation of promising directions for the development of the principle of competition in the field of procurement in the context of new challenges of technological development, uncertainty and risk. **Methods:** analysis of the normative regulation of the contract system in the field of procurement, statistical analysis of data and trends in the development of competitive methods of public and corporate procurement, criterion analysis of supplier selection and competitive pricing in the field of procurement, directly focused on value creation and contract pricing. **Results:** the problem situation of the development of competition in the field of state and corporate procurement, which is based on the reliability and responsibility of participants, fair price and non-price competition, is formulated. Promising directions for the development of competition on the basis of a result-oriented approach, criteria-based analysis and competitive pricing in conditions of uncertainty and risk are substantiated. **Practical significance:** In order to develop the principle of competition in the field of procurement, the need to develop a criterion analysis and criteria for evaluating bids of procurement participants, to improve the mechanism for selecting a supplier based on a risk-based approach, to develop a competitive pricing method taking into account the risk price of the need for additional financing, to substantiate proposals for the development of the contract system in the field of public and corporate procurement based on the principle of competition and its adaptation to new challenges of technological development.

Keywords: challenges of technological development, public procurement, corporate procurement, contract system, principle of competition, criteria analysis, result-oriented approach, contract risk, competitive pricing

References

1. Ob utverzhdenii Kontseptsii tekhnologicheskogo razvitiya na period do 2030 g. [On Approval of the Concept of Technological Development for the Period up to 2030], Decree of the Government

of the Russian Federation dated May 20, 2023, no 1315-r. URL: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/80349.html> (accessed: March 30, 2026). (In Russian)

2. Strategiya razvitiya konkurentsii i antimonopol'nogo regulirovaniya v Rossijskoj Federatsii na period do 2030 goda [The Strategy for the Development of Competition and Antitrust Regulation in the Russian Federation for the Period up to 2030], approved by the Protocol of the Presidium of the FAS of Russia dated July 03, 2019, no. 6. URL: <https://fas.gov.ru/documents/685792> (accessed: March 30, 2026). (In Russian)

3. O kontraktnoj sisteme v sfere zakupok tovarov, rabot, uslug dlya obespecheniya gosudarstvennykh i munitsipal'nykh nuzhd [On the Contract System in the Field of Procurement of Goods, Works, Services for State and Municipal Needs], Federal Law of the Russian Federation dated 05.04.2013 No 44-FZ (as amended on December 28, 2025). (In Russian)

4. O zakupkakh tovarov, rabot, uslug ot del'nymi vidami yuridicheskikh lits [On Procurement of Goods, Works, Services by Certain Types of Legal Entities], Federal Law of the Russian Federation dated 18.07.2011, no 223-FZ (as amended on August 08, 2024). (In Russian)

5. Otchet o rezul'tatakh ekspertno-analiticheskogo meropriyatiya "Analiz vozmozhnykh prichin priznaniya zakupok tovarov, rabot, uslug dlya obespecheniya gosudarstvennykh i munitsipal'nykh nuzhd nesostoyavshimisya" [Report on the Results of the Expert and Analytical Event "Analysis of Possible Reasons for Recognizing the Procurement of Goods, Works, Services to Meet State and Municipal Needs as Failed"], Schetnaya palata RF, approved by the Board of the Accounts Chamber of the Russian Federation on 26.09.2024, Accounts Chamber of the Russian Federation, Moscow, 2024, 42 p. (In Russian)

6. Svodnye analiticheskie otchety o rezul'tatakh monitoringa zakupok tovarov, rabot, uslug dlya obespecheniya gosudarstvennykh i munitsipal'nykh nuzhd, a takzhe zakupok tovarov, rabot, uslug ot del'nymi vidami yuridicheskikh lits za 2021–2024 gg. [Consolidated Analytical Reports on the Results of Monitoring the Procurement of Goods, Works, Services to Meet State and Municipal Needs, As Well As Procurement of Goods, Works, Services by Certain Types of Legal Entities for 2021–2024], Ministry of Finance of the Russian Federation: official website. URL: <https://minfin.gov.ru/ru/performance/contracts/purchases> (accessed: March 30, 2026). (In Russian)

7. FAS rassmotrela bolee 39 tysyach zhalob ot uchastnikov zakupok v 2024 godu: novost' ot 24.01.2025 [The FAS Considered More Than 39 thousand Complaints From Procurement Participants In 2024: news from January 24, 2025], Federal Antimonopoly Service: official site. URL: <https://fas.gov.ru/news/33751> (accessed: March 30, 2026). (In Russian)

8. FAS: zakupka u edinstvennogo postavshchika dolzhna byt' obosnovana i provodit'sya v isklyuchitel'nykh sluchayakh: novost' ot 29.08.2024 [FAS: Procurement from a Sole Supplier Should Be Justified and Carried Out in Exceptional Cases: news from August 29, 2024], Federal Antimonopoly Service: official site. URL: <https://fas.gov.ru/news/33423> (accessed: March 30, 2026). (In Russian)

9. Tikhomirov P., et al. Analiz vysokoj doli nesostoyavshikh konkurentnykh protsedur (torgov) v kontraktnoj sisteme: analiticheskaya zapiska [Analysis of the High Share of Failed Competitive Procedures (Tenders) in the Contract System: Analytical Note], Moscow, 2022, 23 p.

URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/e8b/xj0atj1uwnz6qfyg74e1bju7vtuu0896.pdf> (accessed: March 30, 2026). (In Russian)

10. Anchishkina O. V. Osobennosti tsenoobrazovaniya v zakupkakh [Features of Pricing in Procurement], *Goszakaz: upravlenie, razmeshchenie, obespechenie* [State Order: Management, Placement, Support], 2015, no. 42, pp. 54–61. (In Russian)

11. Panteleeva M. S., Bulina A. R., Yakubovich A. M. Konkurentsia v sfere krupnykh stroitel'nykh lotov pri provedenii podryadnykh torgov [Competition in the Field of Large Construction Lots in the Conduct of Contract Bidding], *Moskovskij ekonomicheskij zhurnal* [Moscow Economic Journal], 2021, no. 6, pp. 389–398. (In Russian)

12. Kochergin A. V. Razvitie metodov tsenoobrazovaniya v gosudarstvennykh zakupkakh [Development of Pricing Methods in Public Procurement], *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments], 2018, no. 2, pp. 254–256. (In Russian)

13. Belozor F. I. Zakupki dlya gosudarstvennykh nuzhd: garmonizatsiya dobrosovestnoj konkurentsii i ekonomicheskoy effektivnosti [Procurement for State Needs: Harmonization of Fair Competition and Economic Efficiency], *Gosudarstvennoe i munitsipal'noe upravlenie. Uchenye zapiski* [State and Municipal Management Scholar Notes], 2021, no. 1, pp. 93–101. (In Russian)

14. Guryeva S. R. Obespechenie konkurentsii pri zaklyuchenii gosudarstvennykh kontraktov [Ensuring Competition in the Conclusion of State Contracts], *Vestnik Rossijskoj pravovoj akademii* [Bulletin of the Russian Law Academy], 2023, no. 3, pp. 136–146. (In Russian)

15. Oparin S. G., Shcherbakova M. A. Novaya tsifrovaya vizualizatsiya upravleniya kontraktnym riskom v sfere zakupok. Upravlenie riskami: problemy i resheniya (RISK'E-2022). Trudy nauch.-prakt. konf. s zarubezh. Uchastiem [New Digital Visualization of Contract Risk Management in the Field of Procurement, Risk Management: Problems and Solutions. Proceedings of Scientific Practice. conf. from abroad, Ed. by S. G. Oparin], Saint Petersburg, Polytech-Press, 2023, pp. 231–243. (In Russian)

16. Mironov S. I. Predel'nye tseny v sfere zakupok i ikh opredelenie na osnove risk-orientirovannogo podkhoda [Marginal Prices in the Field of Procurement and Their Determination on the Basis of a Risk-Oriented Approach], Risk Management: Problems and Solutions. Proceedings of Scientific Practice. conf. from abroad. Ed. by S. G. Oparin. Saint Petersburg, Polytech-Press, 2025, pp. 72–78. (In Russian)

Received: April 7, 2026

Accepted: May 24, 2026

Author's information:

Sergey I. MIRONOV — Postgraduate Student; serzh-mironov-000@mail.ru

Sergey G. OPARIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; oparinsg@mail.ru