

# ИЗВЕСТИЯ

№ 3(63)

2025

# Транссиб



## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Овчаренко Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
2. **Галиев Ильхам Исламович** – зам. главного редактора, советник при ректорате ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ (Омск).
3. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – зам. главного редактора, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
4. **Алексеев Виктор Михайлович** – профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТа (МИИТа), д.т.н., профессор (Москва).
5. **Бессоненко Сергей Анатольевич** – профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., доцент (Новосибирск).
6. **Ведрученко Виктор Родионович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
7. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. **Горюнов Владимир Николаевич** – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. **Гуда Александр Николаевич** – проректор по научной работе РГУПС, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
10. **Зыкина Анна Владимировна** – заведующая кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. **Исаков Александр Леонидович** – зав. кафедрой «Изъяснения, проектирование и постройки железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. **Ким Константин Константинович** – заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники и энергетики» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. **Комяков Александр Анатольевич** – проректор по цифровой трансформации и связи с производством ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
14. **Косарев Александр Борисович** – научный руководитель института – ученый секретарь АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
15. **Кузнецов Андрей Альбертович** – заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
16. **Лебедев Виталий Матвеевич** – д.т.н., профессор (Омск).
17. **Никитин Александр Борисович** – профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. **Лившиц Александр Валерьевич** – заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» ИргУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. **Лю Цзянькунь** – доктор, профессор, заместитель декана Школы гражданского строительства университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
20. **Парамонов Александр Михайлович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
21. **Сидоров Олег Алексеевич** – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
22. **Смердин Александр Николаевич** – первый проректор, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. **Солоненко Владимир Гельевич** – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛТ Университета имени Мухаммеждана Тынышпаева, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТТГУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
25. **Харламов Виктор Васильевич** – заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).

## EDITORIAL BOARD

1. **Ovcharenko Sergey Mikhailovich** – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. **Galiev Ilkham Islamovich** – deputy chief editor, the advisor to the rector's office of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. **Shantarenko Sergey Georgievich** – deputy chief editor, professor of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. **Alekseev Viktor Mikhailovich** – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
5. **Bessonenko Sergey Anatolevich** – professor of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., associate professor (Novosibirsk, Russia).
6. **Vedruchenko Victor Rodionovich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. **Glinka Tadeusz** – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
8. **Goryunov Vladimir Nikolaevich** – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. **Huda Alexander Nikolaevich** – vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
10. **Zykina Anna Vladimirovna** – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. **Isakov Alexander Leonidovich** – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
12. **Kim Konstantin Konstantinovich** – head of the department «Theoretical foundations of electrical engineering and power engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
13. **Komyakov Aleksandr Anatolevich** – vice-rector for digital transformation and industrial relations of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
14. **Kosarev Alexander Borisovich** – scientific director of the institute – scientific secretary of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
15. **Kuznetsov Andrey Albertovich** – head of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. **Lebedev Vitaliy Matveyevich** – D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. **Nikitin Aleksandr Borisovich** – professor of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
18. **Livshits Alexandr Valerievich** – head of the department «Automation of Production Processes» of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
19. **Liu Jiansun** – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
20. **Paramonov Aleksandr Mikhailovich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
21. **Sidorov Oleg Alexeevich** – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
22. **Smerdin Aleksandr Nikolaevich** – the first vice-rector, vice-rector by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
23. **Solonenko Vladimir Gelyevich** – professor of the department «Rolling stock» of AIT of Mukhamedzhan Tynyspaev University, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Locomotives and locomotive facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. **Kharlamov Viktor Vasilyevich** – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Галиев И. И., Петракова А. Г., Минжасаров М. Х. Исследование продольной динамики поезда на основе дискретной модели..... 2
- Третьяков В. А., Паранин А. В. Определение переходного сопротивления в местах контакта щебня с рельсом..... 14
- Баканова Е. И., Булаев Е. А., Незевак В. Л. Оценка показателей графиков нагрузки трансформаторных подстанций при развитии сети зарядных станций электромобилей..... 26
- Агеев М. А., Авдеева К. В. Повышение точности регрессионных моделей для определения собственного сопротивления элементов заземляющих устройств тяговых подстанций..... 38
- Космодамианский А. С., Карпов А. Е., Фатеев А. А. Модернизация тягового привода грузовых электровозов с целью улучшения сцепных свойств..... 48
- Менакер Г. М., Пудовиков О. Е. Система автоматического управления пневматическим торможением грузового поезда с функцией идентификации параметров тормоза..... 60
- Савоськин А. Н., Васильев А. П. Влияние параметров пружины, последовательно включенной с гидравлическим гасителем колебаний, на диссипативные силы гасителя и коэффициенты динамики в буксовой ступени рессорного подвешивания рельсового экипажа..... 72

### Управление процессами перевозок

- Соколов М. М., Ходкевич А. Г., Петракова К. В. Оценка изменения входного сопротивления рельсовой цепи при движении железнодорожного подвижного состава..... 79

### Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

- Баротов Ж. С., Ташматова М. С. Мероприятия по ускорению доставки грузов в логистической цепи..... 90
- Икрамова Д. З. Проблема отсутствия интеграции тарифов между городским и пригородным транспортом Ташкентской агломерации.... 100

### Электроэнергетика

- Синицин В. И., Цыганков М. С., Палагушкин Б. В. Пожарная опасность диэлектрической среды трансформатора..... 106

### Электротехнические комплексы и системы

- Плотников И. И., Горский А. Н. Искажение напряжения на выходе импульсных трансформаторов и рекомендации по его уменьшению... 116

### Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Мудрая Н. Г., Марюхненко В. С., Мухопад А. Ю. Эффективные технологии диагностики рельсовых цепей: моделирование распространения широкополосных сигналов и минимизация потерь..... 124
- Зайцев Н. С., Кубарев В. А., Кузнецова Е. С. Качество регулирования в системах автоуправления синхронного электропривода при учете насыщения магнитной системы машины..... 138

Научно-технический журнал «Известия Транссиб» / Journal of Transsib Railway Studies

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ))»

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

И. И. Галиев<sup>1</sup>, А. Г. Петракова<sup>1</sup>, М. Х. Минжасаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ПОЕЗДА НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

**Аннотация.** В статье рассмотрены причины обрыва грузовых поездов, происходящего чаще всего из-за резкого перехода от сжатого состояния в растянутое. Это становится возможным ввиду неисправности тормозной системы (утечки, закупорка калиброванных отверстий воздухораспределителя) и, конечно, из-за нарушения технологии управления поездом, последняя причина зависит и от характеристик тяговых и тормозных средств подвижного состава, и от опыта и мастерства машиниста, особенно при сложном профиле пути. Установлена зависимость обрывов от времени года по причине частой пробоксовки колесной пары и снижения прочностных характеристик металла автосцепки. В связи с этим решение задач динамики поезда с целью определения рациональных приемов вождения поезда является актуальным. Используются существующие методики построения моделей.

Представлены результаты исследований продольной динамики поезда на основе дискретной модели. Расчет производился для режимов торможения и тяги во временной области, для чего заранее были определены силы, действующие на вагоны и локомотив в зависимости либо от времени (сила тяги и торможения), либо от скорости движения (силы сопротивления). С помощью математического моделирования были получены значения перемещения, скорости для каждого вагона с номером в составе, кратным пяти. Анализ полученных результатов показал, что в режиме торможения возникают повышенные продольные силы в середине состава поезда.

Полученная модель позволяет изучить силы, действующие на составы с порожними вагонами, для выдавливания которых из состава необходимы относительно незначительные силы.

**Ключевые слова:** грузовой поезд, обрыв автосцепки, управление поездом, режим тяги, режим торможения, профиль пути, модель динамики, дискретная модель.

Ilkham I. Galiev<sup>1</sup>, Anna G. Petrakova<sup>1</sup>, Marat Kh. Minzhasarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;

<sup>2</sup> Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

## INVESTIGATION OF THE LONGITUDINAL DYNAMICS OF A TRAIN BASED ON A DISCRETE MODEL

**Abstract.** The article discusses the causes of freight train breakage, which occur due to a number of reasons, but one of the main ones is a sudden transition from a compressed state to a stretched one. This becomes possible due to a malfunction of the braking system (leaks, blockage of the calibrated air distributor openings) and, of course, the train control technology. Train control technology depends on the characteristics of the traction and braking systems of the rolling stock, as well as on the experience and skill of the driver in difficult track conditions. The dependence of breaks on the season has been established due to the frequent jamming of the wheelset and a decrease in the strength characteristics of the metal of the coupling. In this regard, it is important to solve the problems of train dynamics to determine the rational methods of train driving. The existing methods of model construction are considered.

The results of studies of the longitudinal dynamics of a train based on a discrete model are presented. The calculation was performed for two modes: braking and traction, in the time domain, for which the forces acting on wagons and locomotives were determined in advance, depending either on time (traction and braking force) or on the speed of movement (drag force). As a result of mathematical modeling, the values of displacement and speed for each wagon with a multiple of five were obtained. An analysis of the results showed that significant longitudinal forces occur in the middle of the train during braking. The resulting model allows us to study the forces acting on trains with empty wagons, which require relatively minor forces to squeeze out of the train.

**Keywords:** train, automatic coupling breakage, train control, traction mode, braking mode, track profile, dynamics model, discrete model.

Анализ обрывов грузовых поездов на ряде дорог показал, что имеются некоторые общие закономерности и причины разрывов автосцепок. Основная причина – резкий переход одной части состава из сжатого состояния в растянутое: остальные части поезда действуют на эту группу вагонов оттяжкой [1]. При действии прямой и обратной ударных волн возникают растягивающие продольные силы, превышающие допустимые по прочности автосцепки или рамы вагона. Технология управления поездом зависит от характеристик тяговых и тормозных средств подвижного состава.

Результаты технического состояния тормозов подвижного состава на Северо-Кавказской, Октябрьской и Забайкальской железных дорогах позволили установить: непосредственно на работу тормозов расходуется около 12 % сжатого воздуха, вырабатываемого компрессорами локомотива; около 18 % используют потребители пневматической системы локомотива – песочница, тифон, цепи управления; остальные 70 % затрачиваются на пополнение утечек. Следствием недостаточной плотности тормозной системы является затяжной отпуск воздухораспределителей в хвостовой части состава и снижение скорости движения поезда. В связи с этим большое значение имеет реализация технических мероприятий, направленных на снижение зарядного давления и повышение плотности соединения тормозных сетей. Последнее способствует не только уменьшению энергетических затрат на ведение поезда и повышению срока службы компрессоров, но главное – улучшению управляемости тормозными средствами поезда, что играет важнейшую роль в обеспечении безопасности движения.

Помимо состояния тормозной системы особое значение имеет технология управления поездом, а в частности, трогание и движение поезда на подъеме, спуске и по сложному профилю пути. Машинист должен обладать высоким мастерством, опытом и навыками для трогания поезда с места на подъеме, чтобы предотвратить боксование локомотива, реализующего максимальную силу тяги, следствием чего являются потеря силы тяги и новая остановка. Вид тяги, не будучи определяющей причиной разрушения автосцепок, сказывается на закономерности распределения обрывов автосцепки по длине состава вследствие различного реализуемого коэффициента сцепления у электровозов и тепловозов.

Большое количество обрывов поездов происходит при движении по подъему, спуску, переломному профилю. К традиционным причинам обрыва поездов и при рекуперации, и при реостатном торможении относятся неприменение тормоза локомотива в момент прекращения электрического торможения и происходящий одновременно с этим быстрый отпуск автотормозов. Если машинист не полностью замещает рекуперативное торможение пневматическим, происходит откат головной части поезда. В это время тормозная волна доходит до вагонов хвостовой части, и они резко затормаживаются. Обрыв, как правило, происходит в последней трети поезда. Когда, применяя одновременно рекуперативный тормоз и автотормоза, машинист на спуске начинает отпускать последние, он должен учитывать возможное снижение тока рекуперации и откат головной части поезда. Если это случится на спуске с различными элементами профиля большой кривизны, произойдет обрыв поезда в его первой трети или в середине.

По обобщенным статистическим данным установлена закономерность распределения обрывов автосцепок по длине поезда. В головной части поезда разрывы происходят в результате резкого приложения большой силы тяги, в середине состава – вследствие оттяжек и понижения энергоемкости поглощающих аппаратов автосцепки; в хвостовой части они обусловлены увеличением времени отпуска автотормозов при больших утечках воздуха из тормозной сети. Концентрация большой тяговой мощности в голове поезда при объединении секций локомотивов приводит к увеличению числа разрывов автосцепок, особенно на путях, где наблюдается низкое сцепление колес с рельсами, в кривых и на подъемах. Обрыв автосцепки чаще всего происходит в головной части поезда. В случае рассредоточения локомотивов вдоль поезда возрастает опасность его разрыва в результате несинхронных

управляющих действий машинистов; при этом возможно выжимание вагонов вторым локомотивом, обеспечивающим подталкивающий эффект для них.

Количество обрывов увеличивается в холодное время года. На зимние месяцы (декабрь – февраль) приходится треть обрывов, на летние – примерно 10 %. Максимум обрывов в зимние месяцы превышает среднегодовое значение почти в два раза. Этому способствуют увеличение сопротивления движению поезда в результате загустевания смазок в узлах экипажной части подвижного состава, снижение прочности металла при низких температурах, большие утечки сжатого воздуха из-за нарушения уплотнений, образование ледяных пробок в тормозной сети, а также техническое состояние самой автосцепки. Обследования поездов показывают, что имеются автосцепки без трещин, но с пониженной прочностью на разрыв, обусловленной усталостью металла в результате длительного срока эксплуатации. При понижении температуры, начиная с  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , металл становится хрупким. Исследованиями ВНИИЖТа установлено, что при температуре ниже  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  прочность автосцепки на разрыв снижается практически в два раза и число обрывов резко возрастает. Большинство разрушений автосцепок происходит в месте перехода к хвостовику (60 %), по клиновому отверстию (25 %) и в хвостовике (15 %).

Таким образом, основными причинами обрывов поездов являются резкое приложение силы тяги при трогании состава и ведении поезда по пути переломного профиля и плана, ухудшение управляемости автотормозами в случае увеличения времени отпуска воздухораспределителей вследствие больших утечек воздуха из тормозной сети, значительное снижение прочности автосцепок и уменьшение энергоемкости поглощающих аппаратов в процессе эксплуатации.

Названные выше обстоятельства подтверждают актуальность задач динамики по определению рациональных приемов вождения тяжеловесных и длинносоставных поездов, установлению оптимальных способов управления поездом, выбору характеристик автотормозов и параметров поглощающих аппаратов автосцепки.

В работе рассмотрены процессы трогания с места и движения поезда под действием силы тяги локомотивов на горизонтальных участках и переломах продольного профиля пути, рассмотрены составы, сформированные из однотипных и одинаково нагруженных вагонов, в соединениях которых зазоры отсутствуют, и приняты линейные силовые характеристики фрикционных поглощающих аппаратов автосцепки. Эти допущения дали возможность использовать линейные дифференциальные уравнения, что позволило на основании аналитических зависимостей изучить основные особенности исследуемых процессов. Исследованы также установившиеся режимы движения поезда, в которых продольные силы определяются только приложенными в данный момент внешними силами и не зависят от характеристик межвагонных соединений.

При исследовании переходных режимов движения неоднородных поездов использовалась линейная теория колебаний стержней, поскольку такой поезд состоит из разных групп вагонов, каждая из которых включает в себя только одинаковые вагоны и рассматривается как однородный стержень, для которого математически в дополнение к граничным были сформулированы условия сопряжения участков. Полученная система уравнений оказалась громоздкой, и результаты были рассмотрены только для небольшого числа указанных стержней. Большой эффект при исследовании переходных режимов движения неоднородных поездов дает рассмотрение стержней переменного сечения с сосредоточенными включениями.

При теоретическом исследовании динамики торможения решающее значение имеет выбор математической модели, наиболее точно описывающей процесс возникновения и распространения тормозных сил в поезде. В некоторых исследованиях принималось, что тормозная сила достигает своего максимального значения мгновенно, как только возмущение достигает рассматриваемого сечения. Другие исследователи считали, что тормозная сила распространяется вдоль поезда с постоянной скоростью и достигает наибольшего значения в течение некоторого промежутка времени. Характер нарастания тормозной силы принимался

одинаковым для всех вагонов поезда, тогда как ее рост для экипажей определяется характеристиками воздухораспределителей, длиной поезда и режимом торможения.

На неустановившиеся режимы движения грузовых поездов большое влияние оказывают характеристики межвагонных аппаратов, в общем случае нелинейные, а также зазоры в автосцепках, достигающие в эксплуатации 60 – 80 мм.

Таким образом, задача, решаемая при исследовании неустановившегося режима тяги или торможения, связана с колебанием многомассовой системы, вдоль которой распространяется изменяющееся возмущение.

Способы теоретического исследования переходных режимов движения грузовых поездов определяются принятой расчетной схемой поезда. При выборе ее для исследования неустановившихся режимов торможения необходимо учитывать, что современные грузовые вагоны связаны разрезной упряжью с автоматическими сцепками и поглощающими аппаратами.

Теоретическое изучение переходных режимов движения поездов было начато Н. Е. Жуковским. Им были рассмотрены процессы, происходящие при трогании поезда с места и в начале его движения, исследовались силы в винтовой сцепке в случае сквозной и несквозной упряжи. Для неразрезной винтовой упряжи, когда через весь состав проходит сквозной стержень и на нем с помощью упругих пружин укреплены вагоны, дано полное решение задачи и предложены формулы, позволяющие определить силы при натянутых и провисших сцепках.

Предложенные Н. Е. Жуковским две расчетные схемы, т. е. две модели поезда (непрерывная и дискретная), в дальнейшем совершенствовались и использовались многими исследователями для решения различных задач продольной динамики.

Всесторонне исследованы переходные режимы движения поездов В. А. Лазаряном; им раскрыты общие закономерности волнового характера распространения возмущений вдоль поезда. Для учета диссипативных свойств поездной системы и оценки влияния сопротивлений, обусловленных взаимными перемещениями вагонов, В. А. Лазарян предложил рассматривать состав как упруговязкий стержень или как упругий стержень с гистерезисом.

С. А. Вершинский, анализируя движение по перелому профиля пути, представлял поезд в виде непрерывного и нерастяжимого гибкого стержня с сосредоточенными массами (локомотивами) по концам, т. е. как неизменяемую по длине механическую систему. Используя теорему о движении центра масс системы, он дал решение по определению продольных сил в автосцепках грузового вагона при установившемся движении.

Н. А. Панькин при исследованиях пользовался непрерывной моделью поезда как одномерной стрелы с нелинейными уравнениями состояния межвагонных связей. Он качественно выяснил характер распространения сильных возмущений вдоль поезда, показал, что в поезде с нелинейными необратимыми связями этот процесс резко отличается от распространения малых возмущений, и установил образование в поезде ударных волн.

В дальнейших исследованиях динамики поезда наибольшее распространение получила дискретная, повагонная модель с различным определением тормозных сил экипажей. По мере расширения возможностей вычислительной техники появились новые пути совершенствования расчетных схем межвагонных связей и самих вагонов. Начали принимать во внимание не только характеристики поглощающих аппаратов автосцепки, но и упругие свойства конструкции вагона, учитывать особенности процессов возникновения и распространения тормозных сил в поезде. При исследовании влияния сухих и жидких грузов на продольные колебания в поезде вагоны представляют как двухмассовые модели, а груз рассматривают как систему с распределенной массой.

Была изучена также устойчивость вагонов в колее от выжимания продольными сжимающими силами и от стаскивания продольными растягивающими силами в кривых участках пути.

В. Г. Иноземцев и В. В. Крылов рассчитывали тормозную силу поезда при конкретных воздухораспределителях непосредственно по осциллограммам давлений в тормозных цилиндрах вагонов, записанным в лаборатории на групповой тормозной станции.

Исследуя нестационарные режимы тяги, А. Л. Лисицын и Л. А. Мугинштейн ввели повагонную модель поезда составной частью в математическую модель «локомотив – состав – путь». Усовершенствованная ими комбинированная модель состоит из системы уравнений, описывающих продольные взаимодействия в составе поезда, вертикальную динамику экипажа, процессы в тяговом приводе и в контакте колеса локомотива с рельсами.

Эта модель была применена при исследовании переходных режимов движения поезда критической массы в сложных условиях эксплуатации. Предложенная методика выбора нагруженности электровоза по сцеплению обеспечивает его эффективную и надежную работу, рассмотрен также выбор критической нормы массы поезда. Используемые при этом подходы являются развитием основных положений теории тяги и динамики поезда. Выполнена оценка вертикальных и продольных сил, показано влияние крутизны подъема на процессы продольной динамики в поезде с учетом нестационарных режимов тяги.

Для решения этих задач впервые в мировой практике профессор В. А. Лазарян использовал метод электрического моделирования продольных колебаний движущегося поезда [2]. В основе этого метода лежит указанная выше вторая расчетная схема профессора Н. Е. Жуковского.

Проведенные расчеты наибольших сил в поезде показали, что определение тормозной силы приводит к результатам, отличающимся от соответствующих значений при более точном представлении тормозных сил, определенных выражениями, меньше чем на 5 % в случае торможения сжатых поездов и на 10 % растянутых.

Учет сопротивления поступательному движению имеет смысл только при исследовании движения на участке пути большой протяженности с чередованием переходных режимов, в остальных случаях им можно пренебречь.

Для анализа динамики поезда обычно используются модели продольной, поперечной и вертикальной динамики [4]. Хотя возможны сочетания трех моделей, но сложности, возникающие при этом, удерживают исследователей от такого подхода. Деление моделей на три вида диктуется соображениями экономии затрат машинного времени. В большинстве случаев справедливо утверждение, что чем выше уровень детализации при построении модели, тем выше требования к затратам машинного времени. Поэтому для получения практически пригодных данных о динамических характеристиках стремятся к минимальной детализации.

Квазидинамическая модель поезда, используемая для изучения его продольной динамики, применима при исследовании аварий, вызванных неправильным формированием и управлением поездов, при расчете тормозных путей, размещении сигнальных знаков, расчете тяговых характеристик локомотива, а также при обследовании существующих схем развязки путей с целью установления отсутствия дополнительных сил, которые могут возникнуть при движении поезда. В этой модели не требуются данные, связанные с поглощающими аппаратами, эти параметры не включаются в состав входных данных. При построении такой модели делается ряд упрощающих допущений:

- 1) тележки каждого экипажа являются твердыми телами (влияние системы подвешивания не учитывается);
- 2) не учитывается влияние устройств подавления извилистого движения;
- 3) два смежных вагона соединяются жесткими сцепками (не допускается смещение головки автосцепки в горизонтальной плоскости);
- 4) силы тяги и усилия при реостатном торможении в диапазоне скоростей, представляющих практический интерес, задаются графически – набором отрезков, а также частями квадратных и кубических парабол;

5) принимается, что каждый экипаж обладает лишь одной степенью свободы (т. е. может совершать только продольное движение);

6) внезапно приложенные силы, обусловленные ослаблением сцепки, аппроксимируются квазистатически;

7) все экипажи, находящиеся между двумя узловыми точками (точки, где обращаются в нуль усилия в сцепном приборе), вдоль поезда имеют одно и то же ускорение.

Как только станут известны силы, действующие на каждый экипаж, включая силу тяги и силу реостатного торможения, создаваемые локомотивом (или локомотивами), можно вычислить ускорение или замедление всей массы поезда. Этим вычислительным процессом предусмотрены два главных этапа: определение квазистатических и квазидинамических сил. При расчете квазистатических сил влиянием свободных зазоров в ударно-сцепных приборах пренебрегают, и силы распределяются вдоль всего поезда. При расчете квазидинамических сил учитывается свободный зазор в ударно-сцепных приборах при вычислении внезапно приложенных сил. Эти силы используются для расчета ускорений отдельных вагонов или группы вагонов, которые движутся вместе.

Для построения полной модели продольной динамики поезда можно воспользоваться подходом, аналогичным тому, который был использован при построении квазидинамической модели. Основное различие между этими двумя моделями состоит в том, что при построении динамической модели каждый экипаж во все моменты времени рассматривается как отдельная масса и не проводится аппроксимация квазистатических сил. Составляется общая система уравнений колебаний, которая используется для расчета колебаний поезда в любой момент времени. Динамическая модель является более подходящим инструментом при исследовании поглощающих аппаратов и их конструктивных модификаций. Для исследования аварий целесообразнее с точки зрения затрат машинного времени использовать более простую квазидинамическую модель, коль скоро главными целями исследования в данном случае являются скорость, путь и временные характеристики поезда.

В этой модели поезда принимается, что каждый экипаж обладает одной продольной степенью свободы. Экипажи, оборудованные плавающей хребтовой балкой, обладают двумя степенями свободы, т. е. одна степень свободы у кузова экипажа, а другая – у плавающей хребтовой балки. В этом случае используются модели ударно-тяговых приборов разрезного типа. Что касается прочих внешних сил, которые действуют на экипажи, то они определяются по той же методике, что рассматривалась применительно к квазидинамической модели. Характеристики упруго-фрикционного аппарата и разрезной упряжи, оснащенной поглощающим аппаратом, являются нелинейными, и поэтому окончательные уравнения колебаний поезда также являются нелинейными.

При построении детальной модели продольной динамики были приняты следующие допущения:

1) масса груза объединяется с массой кузова вагона как единое целое;

2) рассматриваются только продольные колебания (вдоль продольной оси экипажа), несмотря на наличие кривых и резких переломов профиля, принимается, что вклад других видов колебаний пренебрежительно мал;

3) неровности пути, такие, как неправильности рихтовки, поперечного профиля пути, отклонения ширины колеи и от номинального вертикального профиля не учитываются;

4) принимается, что рамы вагонов остаются упругими, хотя под действием постоянных ударов происходит изменение их упругих свойств;

5) принимается, что центр тяжести экипажа расположен на уровне сцепок, в силу этого провести исследование галопирования нельзя.

Модель поезда, рекомендуемая нами для определения продольных сил, предложенная на основе анализа рассмотренных выше исследований представляет собой механическую систему, состоящую из 76 абсолютно твердых тел, соединенных упругодиссипативными связями. Характеристики модели, а именно инерционные, упругие и диссипативные, были



# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

определены для современного подвижного состава. Согласно методике, предложенной профессором Бать М. И., нами была проведена линеаризация упругодиссипативных связей. Расчетная схема приведена на рисунке 1, где  $m$  – массы тел;  $b$  – коэффициенты вязкого трения;  $c$  – жесткости;  $x$  – обобщенные координаты системы.

Для составления математической модели поезда применено уравнение Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{dq_i} \right) - \frac{dT}{dq_i} + \frac{d\Pi}{dq_i} + \frac{d\Phi}{dq_i} = 0. \quad (1)$$

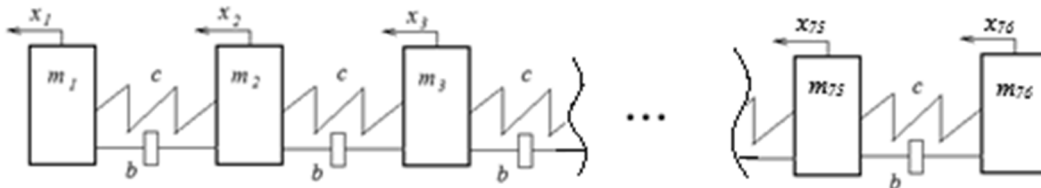


Рисунок 1 – Модель продольной динамики поезда

Кинетическая энергия системы рассчитывается по формуле:

$$T = 0,5m_1\dot{x}_1^2 + 0,5m_2\dot{x}_2^2 + 0,5m_3\dot{x}_3^2 + \dots + 0,5m_{75}\dot{x}_{75}^2 + 0,5m_{76}\dot{x}_{76}^2. \quad (2)$$

Прогибы и скорости прогибов, необходимые для определения потенциальной энергии:

$$\Delta_1 = x_1 - x_2; \quad \Delta_2 = x_2 - x_3; \quad \Delta_3 = x_3 - x_4 \quad \dots \quad \Delta_{73} = x_{73} - x_{74}; \quad \Delta_{74} = x_{74} - x_{75}; \quad \Delta_{75} = x_{75} - x_{76}. \quad (3)$$

Потенциальная энергия системы:

$$\begin{aligned} \Pi = & 0,5c\Delta_1^2 + 0,5c\Delta_2^2 + 0,5c\Delta_3^2 + \dots + 0,5c\Delta_{73}^2 + 0,5c\Delta_{74}^2 + 0,5c\Delta_{75}^2 = 0,5c(x_1 - x_2)^2 + 0,5c(x_2 - x_3)^2 + \\ & + 0,5c(x_3 - x_4)^2 + \dots + 0,5c(x_{73} - x_{74})^2 + 0,5c(x_{74} - x_{75})^2 + 0,5c(x_{75} - x_{76})^2 = 0,5c(x_1^2 - 2x_1x_2 + x_2^2) + \\ & + 0,5c(x_2^2 - 2x_2x_3 + x_3^2) + 0,5c(x_3^2 - 2x_3x_4 + x_4^2) + \dots + 0,5c(x_{73}^2 - 2x_{73}x_{74} + x_{74}^2) + 0,5c(x_{74}^2 - 2x_{74}x_{75} + x_{75}^2) + \\ & + 0,5c(x_{75}^2 - 2x_{75}x_{76} + x_{76}^2) \end{aligned} \quad (4)$$

Диссипативная функция системы:

$$\begin{aligned} \Phi = & 0,5b\dot{\Delta}_1^2 + 0,5b\dot{\Delta}_2^2 + 0,5b\dot{\Delta}_3^2 + \dots + 0,5b\dot{\Delta}_{73}^2 + 0,5b\dot{\Delta}_{74}^2 + 0,5b\dot{\Delta}_{75}^2 = 0,5b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 + 0,5b(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)^2 + \\ & + 0,5b(\dot{x}_3 - \dot{x}_4)^2 + \dots + 0,5b(\dot{x}_{73} - \dot{x}_{74})^2 + 0,5b(\dot{x}_{74} - \dot{x}_{75})^2 + 0,5b(\dot{x}_{75} - \dot{x}_{76})^2 = 0,5b(\dot{x}_1^2 - 2\dot{x}_1\dot{x}_2 + \dot{x}_2^2) + \\ & + 0,5b(\dot{x}_2^2 - 2\dot{x}_2\dot{x}_3 + \dot{x}_3^2) + 0,5b(\dot{x}_3^2 - 2\dot{x}_3\dot{x}_4 + \dot{x}_4^2) + \dots + 0,5b(\dot{x}_{73}^2 - 2\dot{x}_{73}\dot{x}_{74} + \dot{x}_{74}^2) + 0,5b(\dot{x}_{74}^2 - 2\dot{x}_{74}\dot{x}_{75} + \dot{x}_{75}^2) + \\ & + 0,5b(\dot{x}_{75}^2 - 2\dot{x}_{75}\dot{x}_{76} + \dot{x}_{76}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

Частные производные, входящие в уравнение Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{d\dot{x}_1} \right) = m_1\ddot{x}_1; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{d\dot{x}_2} \right) = m_2\ddot{x}_2; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{d\dot{x}_3} \right) = m_3\ddot{x}_3 \quad \dots \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{d\dot{x}_{74}} \right) = m_{74}\ddot{x}_{74}; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{d\dot{x}_{75}} \right) = m_{75}\ddot{x}_{75};$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{d\dot{x}_{76}} \right) = m_{76} \ddot{x}_{76}; \quad (6)$$

$$\frac{d\Pi}{dx_1} = -c(x_2 - x_1); \quad \frac{d\Pi}{dx_2} = c(x_2 - x_1) - c(x_3 - x_2); \quad \frac{d\Pi}{dx_3} = c(x_3 - x_2) - c(x_4 - x_3) \dots; \quad (7)$$

$$\frac{d\Pi}{dx_{74}} = c(x_{74} - x_{73}) - c(x_{75} - x_{74}); \quad \frac{d\Pi}{dx_{75}} = c(x_{75} - x_{74}) - c(x_{76} - x_{75}); \quad \frac{d\Pi}{dx_{76}} = c(x_{76} - x_{75}); \quad (8)$$

$$\frac{d\Phi}{d\dot{x}_1} = -b(\dot{x}_2 - \dot{x}_1); \quad \frac{d\Phi}{d\dot{x}_2} = b(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - b(\dot{x}_3 - \dot{x}_2); \quad \frac{d\Phi}{d\dot{x}_3} = b(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - b(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) \dots; \quad (9)$$

$$\frac{d\Phi}{d\dot{x}_{74}} = b(\dot{x}_{74} - \dot{x}_{73}) - b(\dot{x}_{75} - \dot{x}_{74}); \quad \frac{d\Phi}{d\dot{x}_{75}} = b(\dot{x}_{75} - \dot{x}_{74}) - b(\dot{x}_{76} - \dot{x}_{75}); \quad \frac{d\Phi}{d\dot{x}_{76}} = b(\dot{x}_{76} - \dot{x}_{75}). \quad (10)$$

Получаем при подстановке систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику поезда:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 - c(x_2 - x_1) - b(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + B_1(t) + W_1(V) = F(t); \\ m_2 \ddot{x}_2 + c(x_2 - x_1) - c(x_3 - x_2) + b(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - b(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + B_2(t) + W_2(V) = 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 + c(x_3 - x_2) - c(x_4 - x_3) + b(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - b(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + B_3(t) + W_3(V) = 0; \\ m_{74} \ddot{x}_{74} + c(x_{74} - x_{73}) - c(x_{75} - x_{74}) + b(\dot{x}_{74} - \dot{x}_{73}) - b(\dot{x}_{75} - \dot{x}_{74}) + B_{74}(t) + W_{74}(V) = 0; \\ m_{75} \ddot{x}_{75} + c(x_{75} - x_{74}) - c(x_{76} - x_{75}) + b(\dot{x}_{75} - \dot{x}_{74}) - b(\dot{x}_{76} - \dot{x}_{75}) + B_{75}(t) + W_{75}(V) = 0; \\ m_{76} \ddot{x}_{76} + c(x_{76} - x_{75}) + b(\dot{x}_{76} - \dot{x}_{75}) + B_{76}(t) + W_{76}(V) = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где  $B(t)$ ,  $W(V)$ ,  $F(t)$  – тормозные силы, силы сопротивления движению, сила тяги.

В итоге получаем:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + T_{1-2} + B_1(t) + W_1(V) = F(t); \\ m_2 \ddot{x}_2 + T_{2-3} + B_2(t) + W_2(V) = T_{1-2}; \\ m_3 \ddot{x}_3 + T_{3-4} + B_3(t) + W_3(V) = T_{2-3}; \\ m_{74} \ddot{x}_{74} + T_{74-75} + B_{74}(t) + W_{74}(V) = T_{73-74}; \\ m_{75} \ddot{x}_{75} + T_{75-76} + B_{75}(t) + W_{75}(V) = T_{74-75}; \\ m_{76} \ddot{x}_{76} + B_{76}(t) + W_{76}(V) = T_{75-76}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $T$  – силы взаимодействия вагонов и локомотива.

Вводим параметры для моделирования в MathCad:

$$\begin{cases} x_{76} = x_0; \\ \dot{x}_{76} = x_1; \\ x_{75} = x_2; \\ \dot{x}_{75} = x_3 \dots; \\ x_{74} = x_4; \quad x_2 = x_{148}; \\ \dot{x}_{74} = x_5; \quad \dot{x}_2 = x_{149}; \\ x_1 = x_{150}; \\ \dot{x}_1 = x_{151}. \end{cases} \quad (13)$$

Запишем систему в нормализованном виде:

$$\begin{cases}
 \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} [c(x_{148} - x_{150}) + b(x_{149} - x_{151}) - B_1(t) - W_1(V) + F]; \\
 \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} [-c(x_{148} - x_{150}) + c(x_{146} - x_{148}) - b(x_{149} - x_{151}) + b(x_{147} - x_{149}) - B_2(t) - W_2(V)]; \\
 \ddot{x}_3 = \frac{1}{m_3} [-c(x_{146} - x_{148}) + c(x_{144} - x_{146}) - b(x_{147} - x_{149}) + b(x_{145} - x_{147}) - B_3(t) - W_3(V)]; \\
 \ddot{x}_4 = \frac{1}{m_4} [-c(x_{144} - x_{146}) + c(x_{142} - x_{144}) - b(x_{145} - x_{147}) + b(x_{143} - x_{145}) - B_4(t) - W_4(V)]; \\
 \ddot{x}_{74} = \frac{1}{m_{74}} [-c(x_4 - x_6) + c(x_2 - x_4) - b(x_5 - x_7) + b(x_3 - x_5) - B_{74}(t) - W_{74}(V)]; \\
 \ddot{x}_{75} = \frac{1}{m_{75}} [-c(x_2 - x_4) + c(x_0 - x_2) - b(x_3 - x_5) + b(x_1 - x_3) - B_{75}(t) - W_{75}(V)]; \\
 \ddot{x}_{76} = \frac{1}{m_{76}} [-c(x_0 - x_2) - b(x_1 - x_3) - B_{76}(t) - W_{76}(V)]
 \end{cases} \quad (14)$$

Для решения системы, состоящей из 75 линеаризованных дифференциальных уравнений, использовался метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Расчет производился для двух режимов: торможения и тяги во временной области, следовательно, были заранее определены силы в программе, действующие на вагоны и локомотивы в зависимости либо от времени (сила тяги и торможения), либо от скорости движения (силы сопротивления). В результате математического моделирования были получены значения перемещения, скорости для каждого вагона с номером в составе, кратным пяти. Продольные силы были рассчитаны для сечения состава с номерами вагонов 10-11, 20-21, 30-31 и т. д. При моделировании тормозной силы считалось, что тормозная волна распространяется с постоянной скоростью вдоль состава, начиная с головного, и действует поочередно на каждый вагон. Результаты моделирования приведены на рисунках 2 – 9.

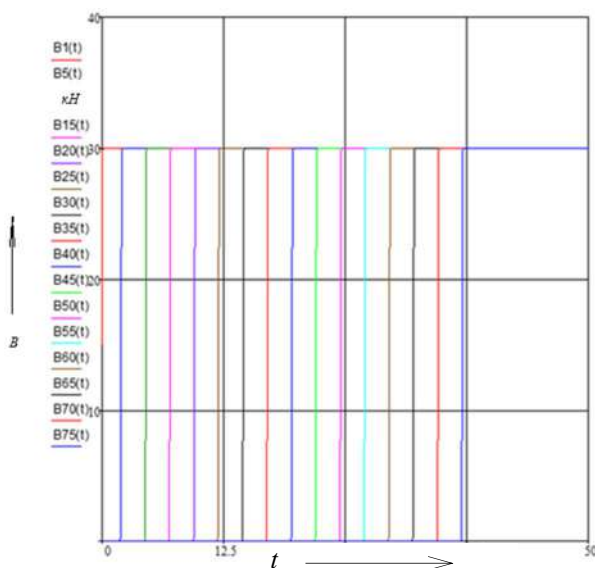


Рисунок 2 – График распределения тормозной силы по вагонам в поезде

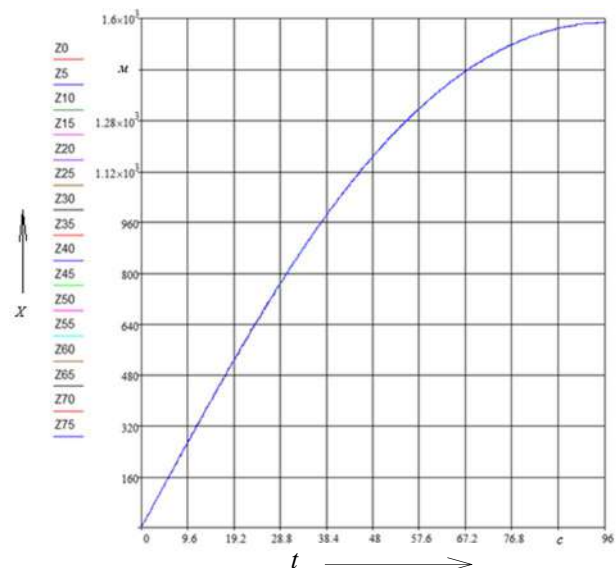


Рисунок 3 – График перемещений вагонов при торможении

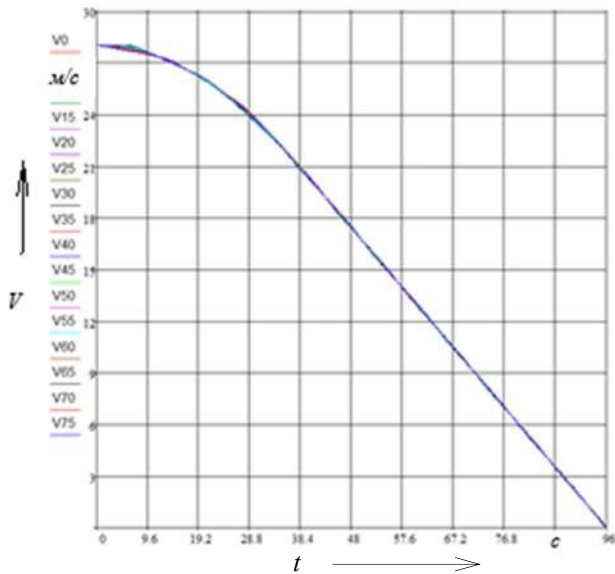


Рисунок 4 – График скоростей вагонов при торможении

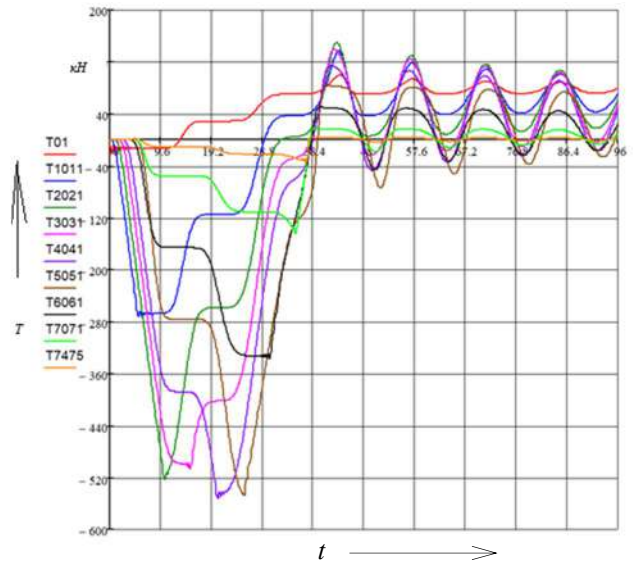


Рисунок 5 – График продольных сил между вагонами (режим торможения)

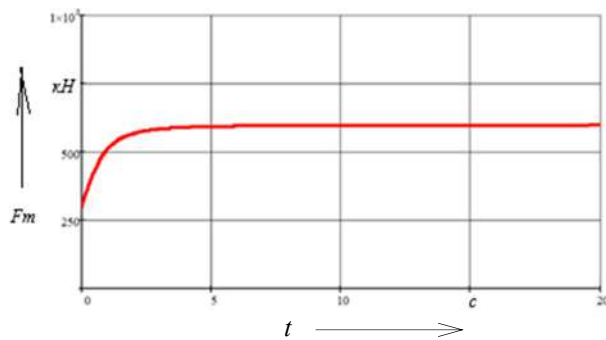


Рисунок 6 – График силы тяги, реализуемой локомотивом в режиме тяги

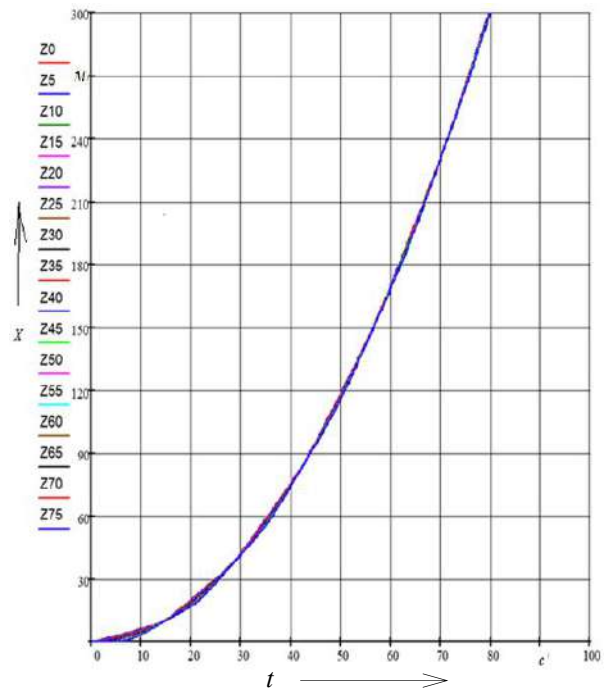


Рисунок 7 – График перемещений вагонов при разгоне

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

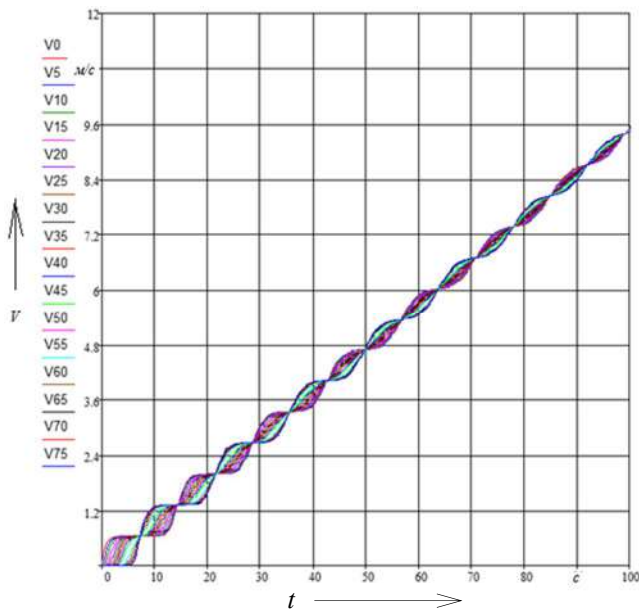


Рисунок 8 – График скоростей вагонов при разгоне

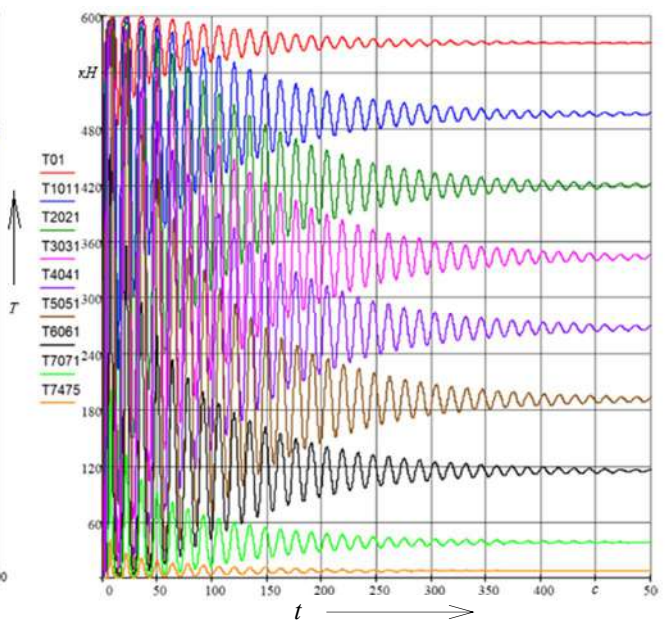


Рисунок 9 – График продольных сил между вагонами (режим торможения)

Анализ полученных результатов показывает следующее.

1. В режиме торможения наибольшие продольные силы возникают в середине состава между вагонами 40 и 41, а также 50 и 51. Расчет производился для однородного поезда с вагонами одинаковой массы.

2. При анализе аварий в длинносоставных поездах необходимо особо рассмотреть вагоны в средней части состава, так как именно в этом сечении возникают значительные продольные силы.

Самостоятельный интерес представляют составы с порожними вагонами, для выдавливания которых из состава необходимы незначительные силы, что возможно исследовать в рамках данной модели поезда.

## Список литературы

1. Гребенюк, П. Т. Продольная динамика поезда / П. Т. Гребенюк. – Москва : Интекст, 2003. – 96 с. – Текст : непосредственный.
2. Вериго, М. Ф. Динамика вагонов / М. Ф. Вериго. – Москва : Всесоюз. заоч. ин-т инж. ж.-д. трансп., 1971. – 175 с. – Текст : непосредственный.
3. Блохин, Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – Москва : Транспорт, 1982. – 222 с. – Текст : непосредственный.
4. Гарг, В. К. Динамика подвижного состава / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати; пер. с англ. К. Г. Бомштейна, под ред. Н. А. Панькина. – Москва : Транспорт, 1988. – 391 с. – Текст : непосредственный.
5. Бабичков, А. М. Тяга поездов и тяговые расчеты / А. М. Бабичков, П. А. Гурский, А. П. Новиков. – Москва : Транспорт, 1971. – 280 с. – Текст : непосредственный.
6. Вершинский, С. В. Динамика вагона / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челноков. – Москва : Транспорт, 1978. – 352 с. – Текст : непосредственный.
7. Рубан, В. Г. Решение задач динамики железнодорожных экипажей в пакете Mathcad / В. Г. Рубан, А. М. Матва. – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – 98 с. – EDN WGAABZ.
8. Блохин, Е. П. От материальной точки до нелинейной пространственной многомассовой модели поезда / Е. П. Блохин, К. И. Железнов, Л. В. Урсуляк. – Текст : непосредственный //

Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, 2009 – № 1 – С. 36–47. – Текст : непосредственный.

9. Юлдашов, А. А. Оценка динамических показателей движения поезда при движении на уклонах / А. А. Юлдашов, О. О. Рахимов. – Текст : непосредственный // *Universum: технические науки*. – 2023. – № 7-2(112). – С. 65–67. – EDN HZEYNG.

10. Сахаров, П. А. Расчетно-экспериментальный метод исследования продольной динамики поезда / П. А. Сахаров. – Текст : непосредственный // *Механика. Исследования и инновации*. – 2020. – № 13. – С. 128–140. – EDN CPREZO.

## References

1. Grebenyuk P.T. *Prodol'naiia dinamika poezda* [The longitudinal dynamics of a train]. Moscow, Intext Publ., 2003, 96 p. (In Russian).

2. Verigo M.F. *Dinamika vagonov* [Dynamics of wagons]. Moscow, The All-Union Correspondence Institute of Railway Transport Engineers Publ., 1971, 175 p. (In Russian).

3. Blokhin E.P., Manashkin L.A. *Dinamika poezda (nestatsionarnye prodol'nye kolebaniia)* [Train dynamics (non-stationary longitudinal oscillations)]. Moscow, Transport Publ., 1982, 222 p. (In Russian).

4. Garg V.K., Dukkipati R.V. *Dinamika podvizhnogo sostava* [Dynamics of rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1988, 391 p. (In Russian).

5. Babichkov A.M., Gurskiĭ P.A., Novikov A.P. *Tiaga poezdov i tiagovye raschety* [Train traction and traction calculations]. Moscow, Transport Publ., 1971, 280 p. (In Russian).

6. Vershinsky S.V., Danilov V.N., Chelnokov I.I. *Dinamika vagona* [Dynamics of the carriage]. Moscow, Transport Publ., 1978, 352 p. (In Russian).

7. Ruban V.G., Matva A.M. *Reshenie zadach dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazheĭ v pakete Mathcad* [Solving problems of railway carriage dynamics in the Mathcad package]. Rostov-on-Don, Rostov State Transport University Publ., 2009, 98 p. (In Russian).

8. Blokhin E.P., Zheleznov K.I., Ursulyak L.V. From a material point to a nonlinear spatial multi-mass train model. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta imeni akademika V. Lazaryana – Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2009, no. 1, pp. 36-47. (In Russian).

9. Yuldashov A., Rakhimov O. Evaluation of dynamic indicators of train movement when moving on slopes. *Universum: tekhnicheskie nauki – Universum: technical sciences*, 2023, no. 7-2(112), pp. 65-67. EDN HZEYNG. (In Russian).

10. Sakharau P.A. Calculation and experimental method for train longitudinal dynamics research. *Mekhanika. Issledovaniia i innovatsii – Mechanics. Researches and innovations*, 2020, no. 13, pp. 128-140. EDN CPREZO. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Галиев Ильхам Исламович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, советник при ректорате, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Galiev Ilkham Islamovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, advisor to the rector's office, honored scientist of RF, professor of the department "Theoretical and applied mechanics", OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

## **Петракова Анна Геннадьевна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: +7 (913) 682-55-36.

E-mail: petra-anna@yandex.ru

## **Petrakova Anna Gennadievna**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department "Wagons and wagon facilities", OSTU.

Phone: +7 (913) 682-55-36.

E-mail: petra-anna@yandex.ru

## **Минжасаров Марат Хайргельдаевич**

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и робототехника», ОмГТУ.

Тел.: +7 (999) 456-85-39.

E-mail: mmx90@yandex.ru

## **Minzhasarov Marat Khajergeldajevich**

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department "Automation and robotics", OmSTU.

Phone: +7 (999) 456-85-39.

E-mail: mmx90@yandex.ru

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ**

Галиев, И. И. Исследование продольной динамики поезда на основе дискретной модели / И. И. Галиев, А. Г. Петракова, М. Х. Минжасаров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 2 – 14.

## **BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION**

Galiev I.I., Petrakova A.G., Minzhasarov M.Kh. Investigation of the longitudinal dynamics of a train based on a discrete model. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 2-14. (In Russian).

УДК 621.311

## **В. А. Третьяков, А. В. Паранин**

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В МЕСТАХ КОНТАКТА ЩЕБНЯ С РЕЛЬСОМ**

**Аннотация.** В статье рассматривается важная научно-техническая проблема определения переходного сопротивления в системе «рельс – земля», которая имеет критическое значение для обеспечения безопасности и эффективности работы железнодорожного транспорта. Предметом исследования выступает механизм растекания электрического тока через балластный слой с учетом особенностей контактного взаимодействия между рельсом и щебнем.

Целью исследования является разработка комплексной методики расчета электротехнических параметров железнодорожного пути. Для достижения поставленной цели применяется методология аналитического моделирования, учитывающая механические характеристики системы, удельное сопротивление материалов и влияние водного слоя. В ходе исследования разработана математическая модель, позволяющая учитывать различные конфигурации контакта щебня с рельсом, включая боковое касание и зажатие под рельсом.

Особое внимание в исследовании уделяется анализу влияния механического напряжения в зоне контакта, поверхностной и объемной проводимости, а также воздействию загрязнения и увлажнения балластного слоя. В результате проведенного исследования разработаны методики расчета переходного сопротивления с учетом различных факторов, построены графики зависимости сопротивления от ключевых параметров системы.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов для прогнозирования электротехнических характеристик железнодорожных путей, оптимизации их эксплуатации и повышения электробезопасности. Разработанная методика позволяет учитывать ключевые факторы, влияющие на переходное сопротивление: состояние поверхности щебня, объемную и поверхностную проводимость, механическое напряжение в зоне контакта. Это дает возможность более точно оценивать электротехнические характеристики железнодорожного пути и принимать обоснованные решения по его обслуживанию и ремонту. Исследование показало, что поверхностная проводимость (обусловленная

загрязнением и пленкой воды) часто оказывает более значительное влияние на общее сопротивление системы, чем объемная проводимость материала.

**Ключевые слова:** переходное сопротивление, рельс, щебень, «рельс – земля», балластный слой, ток, электрический контакт.

Vladislav A. Tretyakov, Alexander V. Paragin

Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, the Russian Federation

## DETERMINATION OF THE TRANSIENT RESISTANCE AT THE POINTS OF CONTACT OF THE CRUSHED STONE WITH THE RAIL

**Abstract.** *The article considers an important scientific and technical problem of determining the transient resistance in the “rail – ground” system, which is of critical importance for ensuring the safety and efficiency of railway transport. The subject of the study is the mechanism of electric current spreading through the ballast layer, taking into account the features of the contact interaction between the rail and the crushed stone.*

*The purpose of the study is to develop a comprehensive methodology for calculating the electrical parameters of a railway track. To achieve this goal, an analytical modeling methodology is applied that takes into account the mechanical characteristics of the system, the resistivity of materials and the influence of the water layer. In the course of the work, a mathematical model was developed that allows taking into account various configurations of crushed stone contact with the rail, including lateral contact and clamping under the rail.*

*Special attention in the study is paid to the analysis of the influence of mechanical stress in the contact zone, surface and volume conductivity, as well as the effects of contamination and moistening of the ballast layer. As a result of the research, methods for calculating transient resistance have been developed, taking into account various factors, and graphs of resistance dependence on key system parameters have been constructed.*

*The practical significance of the work lies in the possibility of applying the results obtained to predict the electrical characteristics of railway tracks, optimize their operation and increase electrical safety. The developed technique makes it possible to take into account the key factors affecting the transient resistance: the condition of the crushed stone surface, volume and surface conductivity, and mechanical stress in the contact zone. This makes it possible to more accurately assess the electrical characteristics of a railway track and make informed decisions on its maintenance and repair. The study showed that surface conductivity (due to contamination and water film) often has a more significant effect on the overall resistance of the system than the bulk conductivity of the material.*

**Keywords:** *transient resistance, rail, crushed stone, “rail – ground”, ballast layer, current, electrical contact.*

Электротехнические характеристики железнодорожного пути играют важную роль в обеспечении безопасности и эффективности движения поездов. Особенно актуальным становится вопрос растекания тока от рельса в землю, что напрямую влияет на работоспособность системы электроснабжения [1, 2]. Механизм растекания тока от рельсов в землю представляет собой сложный процесс. Основными путями распространения тока являются такие: через шпалы и через контакт отдельных кусков щебня с рельсами. При этом второй путь приобретает особую значимость в условиях нарушения технологии укладки пути или при длительной эксплуатации, что требует более детального изучения данного явления. При касании рельса щебнем возможны два случая: боковое прилегание щебня к рельсу и его зажатие под подошвой рельса. Эти различные конфигурации контакта существенно влияют на электротехнические параметры железнодорожного пути, создавая необходимость в их тщательном анализе и моделировании. Важным аспектом исследования является учет влияния водяного слоя, который формируется как на поверхности мокрого щебня, так и в местах контакта его отдельных элементов. Данное явление существенно изменяет электротехнические характеристики системы и требует дополнительного рассмотрения при разработке математических моделей растекания тока [3]. Рельсовые пути играют важную роль в обеспечении безопасности и эффективности движения поездов и являются основой всей железнодорожной инфраструктуры. Целью настоящего исследования является комплексный анализ процессов растекания тока в системе «рельс – земля» с учетом всех влияющих факторов, включая особенности конструкции железнодорожного пути и условия его эксплуатации [4]. Полученные результаты позволят разработать более точные модели для



определения переходного сопротивления «рельс – земля», прогнозирования электротехнических характеристик железнодорожных путей и оптимизации их эксплуатации.

В рамках аналитической модели приняты следующие основные допущения:

форма отдельных частиц щебня принимается условно, каждый элемент материала характеризуется конкретными размерами, которые определяют его массу и объем;

механическая модель реализована в двумерной постановке как задача статики для тела под действием трех сил;

балластный слой представлен как однородная изотропная среда с заданным удельным сопротивлением;

контактное взаимодействие описывается упрощенной моделью упругодеформированных тел с круглым пятном контакта;

поверхностный контакт рассчитывается с учетом сферической аппроксимации формы отдельных частиц балласта;

учитывая, что радиус пятна контакта кусочка щебня с балластом существенно меньше толщины балластного слоя, допустимо считать, что все падение напряжения происходит в данном слое балласта, а влиянием земли можно пренебречь;

водный слой учитывается через параметр удельной поверхностной проводимости.

Данные допущения обеспечивают необходимый баланс между точностью модели и возможностью практического использования с учетом необходимых исходных данных при анализе процессов растекания тока в системе «рельс – земля».

В данной работе рассматривается электрический контакт – соединение двух тел, при котором обеспечивается надежное прохождение электрического тока. Электрический контакт должен передавать энергию электрического тока от одного тела к другому без заметных потерь. Для получения надежного электрического контакта к контактирующим поверхностям необходимо прикладывать некоторое сжимающее усилие [5]. В данном случае расчет контактного сопротивления базируется на классической теории электрических контактов, однако имеет существенные отличия от стандартной модели контакта для металлов. Основное различие заключается в том, что в рассматриваемой системе горные породы обладают высоким удельным сопротивлением, а водяная пленка или загрязнение, наоборот, снижают общее сопротивление контакта благодаря своей более высокой проводимости. Другими словами, при электрическом контакте в рассматриваемом случае, в отличие от контакта металлических сред, необходимо учитывать поверхностную проводимость. При контакте щебня с рельсом частью контактного сопротивления, образованного областью стягивания тока внутри рельса, можно пренебречь.

Проанализируем случай, когда кусок щебня соприкасается с поверхностью рельса сбоку. В этой конфигурации на щебень действует сила тяжести куска щебня,  $H$ :

$$P_{\text{ш}} = m \cdot 9,81, \quad (1)$$

где  $m$  – масса куска щебня, кг.

В зоне контакта между щебнем и рельсом происходит передача нагрузки, при которой щебень воспринимает весовую нагрузку от рельса. Рассмотрим расчет реакции в точке рельса.

Реакция в точке касания щебня снизу,  $H$ .

$$T_{\text{в}} = \sqrt{P_{\text{ш}}^2 + T_{\text{А}}^2}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{А}}$  – реакция в точке рельса,  $H$ .

Расчетная схема с действующими силами показана на рисунке 1.

Концентрация переходного сопротивления «рельс – земля» наблюдается в зоне контактного взаимодействия, где происходит соприкосновение двух поверхностей – рельса и щебня. Рассмотрим формулу для определения радиуса области контакта в точке А,  $m$ :

$$r_{k0} = \sqrt{\frac{T_A}{\frac{\sigma_k}{\pi}}} + h_B, \quad (3)$$

где  $T_A$  – реакция в точке рельса, Н;

$\sigma_k$  – механическое напряжение в контакте, Н/м<sup>2</sup>;

$h_B$  – толщина слоя воды, м.

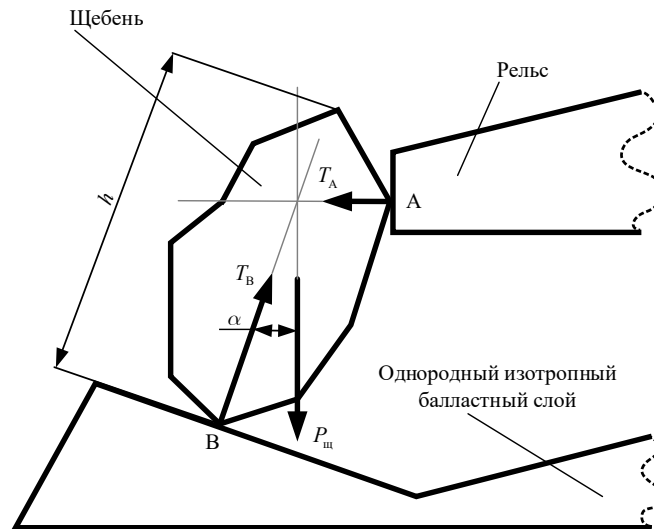


Рисунок 1 – Касание щебня под собственным весом

Радиус пятна контакта в точке В, м,

$$r_{k0} = \sqrt{\frac{T_B}{\frac{\sigma_k}{\pi}}} + h_B, \quad (4)$$

где  $T_B$  – реакция в точке касания щебня снизу, Н.

Площадь контактной области прямо пропорциональна приложенной силе: чем больше величина действующей силы, тем обширнее становится зона контакта поверхностей. Принимая во внимание наличие у куска щебня объемной проводимости, можно утверждать, что возникает переходное сопротивление касания щебня от объемной проводимости, которое определяется по соответствующей формуле, Ом:

$$R_o = \frac{0,5 \cdot R_{ш}}{r_{k0}}, \quad (5)$$

где  $R_{ш}$  – удельное сопротивление породы, Ом·м.

Помимо переходного сопротивления касания щебня от объемной проводимости существует также переходное сопротивление касания щебня от поверхностной проводимости.

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В данном случае существенным фактором выступает наличие водяного слоя на поверхности, функционирующего как дополнительный проводник электрического тока.

Удельная поверхностная проводимость от слоя воды, См,

$$G_B = \frac{h_B}{R_B}, \quad (6)$$

где  $R_B$  – удельное сопротивление воды, Ом·м.

Переходное сопротивление касания щебня от поверхностной проводимости, Ом,

$$R_{\pi} = \frac{0,5}{\frac{G_{\text{щ}} + G_B}{\pi}} \cdot \ln \left( \sqrt{1 + \frac{R_S \cdot h_{\text{щ}}^2 - r_{k0}^2}{r_{k0}^2}} + \frac{\sqrt{R_S \cdot h_{\text{щ}}^2 - r_{k0}^2}}{r_{k0}} \right), \quad (7)$$

где  $G_{\text{щ}}$  – удельная поверхностная проводимость щебня, См;

$h_{\text{щ}}$  – размер куска щебня, м.

На основе анализа объемной и поверхностной проводимости материала становится возможным определить итоговое сопротивление куска щебня, Ом:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_o \cdot R_{\pi}}{R_{\pi} + R_o}. \quad (8)$$

Используя собранные данные о свойствах материалов и их проводимости, мы можем определить переходное сопротивление «рельс – земля» от касания щебня, Ом·км:

$$R_{\text{пер}} = \frac{R_{\text{общ}}}{N_{\text{щ}}}, \quad (9)$$

где  $N_{\text{щ}}$  – количество касаний щебня на 1 м.

Второй вариант представляет собой ситуацию, когда происходит зажатие фрагмента щебня под рельсом (рисунок 2).

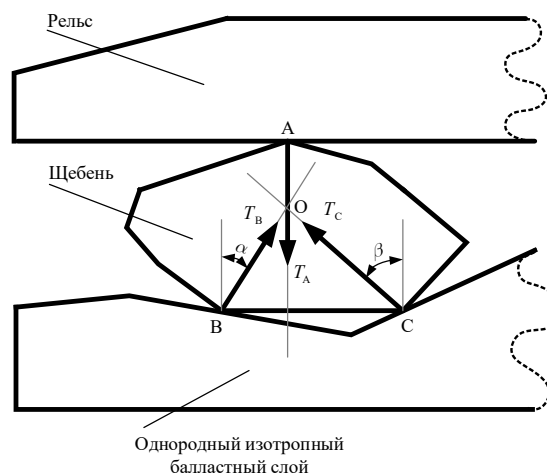


Рисунок 2 – Зажатие куска щебня под рельсом

Важно отметить, что в обоих случаях – при касании щебня под собственным весом (см. рисунок 1) и при зажатии куска щебня под рельсом (см. рисунок 2) – балласт принимается как

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

однородная изотропная среда в соответствии с принятыми допущениями. Эта среда является составляющей переходного сопротивления «рельс – земля» от касания щебня. Математические формулы для расчетов в этом случае остаются такими же, как и в предыдущем варианте. Реакция в точке контакта зажатого щебня с рельсом  $T_A$  является исходной величиной и существенно превышает силу тяжести самого куска щебня. В результате этого реакции  $T_B$  и  $T_C$  при контакте с балластом также значительно возрастают. Как уже было отмечено ранее, увеличение величины действующих сил приводит к расширению области контакта между поверхностями, что, в свою очередь, вызывает уменьшение значения переходного сопротивления между рельсом и землей.

Проанализировав оба сценария, можно построить график, демонстрирующий зависимость переходного сопротивления «рельс – земля» от количества касаний щебня. Данный график представлен на рисунке 3.

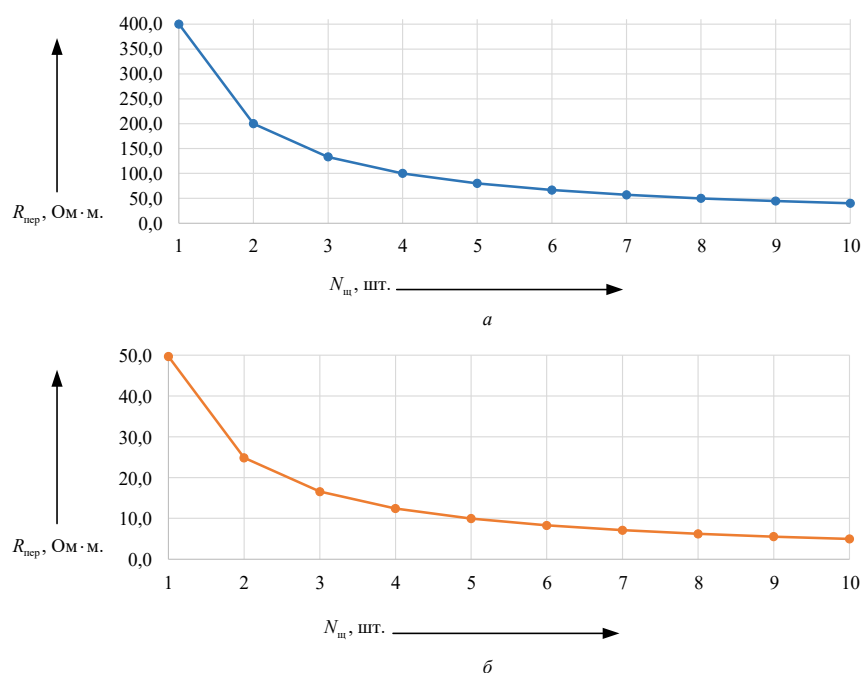


Рисунок 3 – График зависимости переходного сопротивления «рельс – земля» от количества касаний щебня:  
 $a$  – под собственным весом;  $b$  – зажатие под рельсом

Анализ графиков показывает, что боковое касание рельса кусками щебня приводит к незначительной утечке электрического тока. Это объясняется тем, что в такой конфигурации образуется высокое переходное сопротивление между рельсом и балластным материалом. График зависимости переходного сопротивления «рельс – земля» от удельного объемного сопротивления балласта представлен на рисунке 4.

На основе анализа графиков, представленных на рисунке 4, можно утверждать, что наблюдается прямая зависимость: с повышением удельного объемного сопротивления балласта происходит возрастание переходного сопротивления системы. На рисунке 5 представлен график зависимости переходного сопротивления «рельс – земля» от удельной поверхностной проводимости куска щебня.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

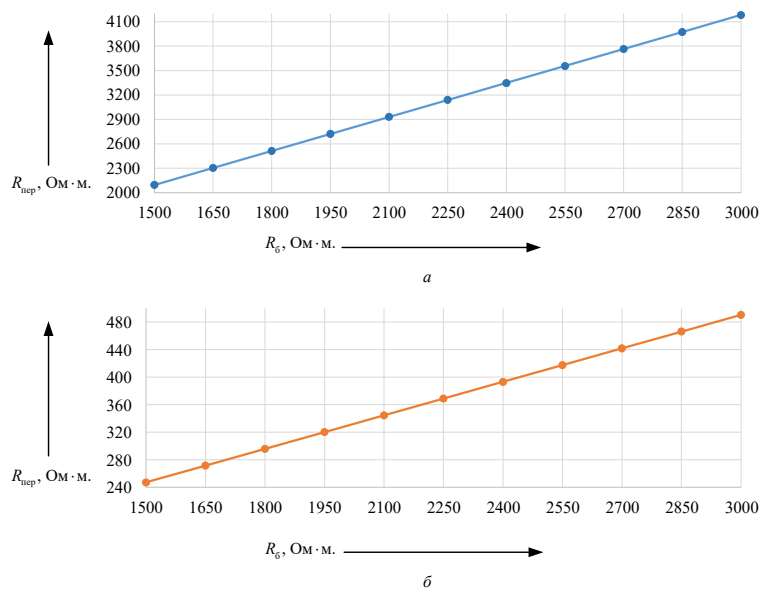


Рисунок 4 – График зависимости переходного сопротивления «рельс – земля» от удельного объемного сопротивления балласта: *a* – под собственным весом; *б* – зажатие под рельсом

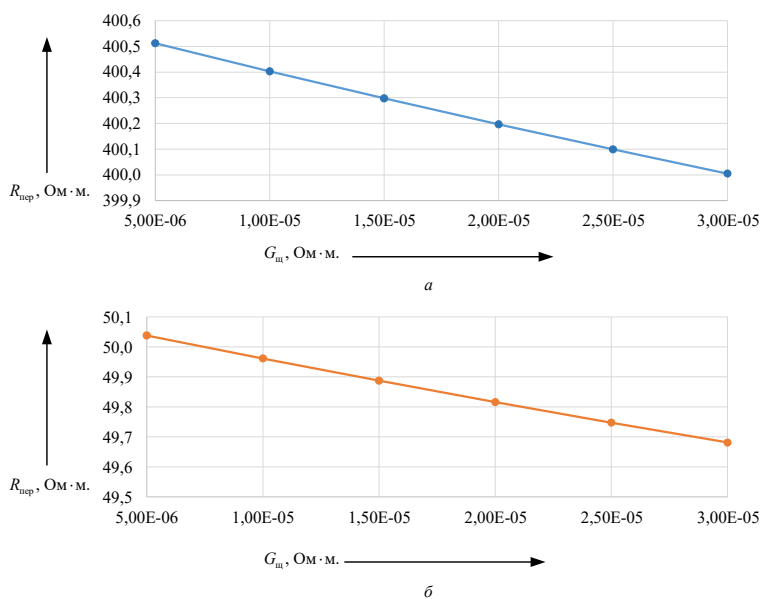


Рисунок 5 – График зависимости переходного сопротивления «рельс – земля» от удельной поверхностной проводимости щебня: *a* – под собственным весом; *б* – зажатие под рельсом

Согласно данным графиков, представленных на рисунках, существует обратная зависимость между удельной проводимостью щебня и переходным сопротивлением: при увеличении первого наблюдается существенное снижение второго. Расчеты показывают, что при контакте рельса со щебнем во многих случаях именно поверхностная проводимость (загрязнение, пленка воды) является ключевым фактором, влияющим на общее сопротивление системы. Она во многих случаях дает больший вклад, чем объемная проводимость.

Переходное сопротивление «рельс – земля» определяется также состоянием балластного щебня [6, 7]. Ключевые факторы в этом случае:

- механическое напряжение в зоне контакта;
- поверхностная проводимость частиц щебня;
- объемная проводимость балластной массы.

Состояние поверхности щебня критически влияет на сопротивление: для сухого чистого щебня показатель – 30 – 60 Ом·км, для сильно загрязненного и влажного – 3 – 7 Ом·км. Загрязнение и увлажнение поверхности щебня существенно снижают переходное сопротивление рельсовой системы.

Щебеночный балласт является важным элементом конструкции железнодорожного пути. Он обеспечивает стабильность рельсов, поглощает воздействия вагонов и помогает в распределении нагрузки на землю. Однако с течением времени балласт может подвергаться засорению и загрязнению, что существенно ухудшает его эксплуатационные характеристики и безопасность движения поездов. При этом каждый элемент щебня контактирует с соседними частицами, находясь в зажатом состоянии. В точках соприкосновения формируются контактные пятна, где проявляются как объемная, так и поверхностная проводимость материала.

Нагрузка на частицы щебня возрастает с увеличением глубины их расположения в балласте. Это обусловлено давлением вышележащих слоев и массой шпал, передаваемым на балластный слой [8, 9]. Загрязнение балласта в основном происходит от проникания в него следующих загрязнителей:

- пыли, переносимой ветром;
- изгари, шлака и мусора от проходящих поездов;
- глинистых и пылеватых грунтов земляного полотна, проникающих в балласт снизу, а возможно, и сбоку;
- продуктов выветривания самого балласта.
- фрагментов изношенных тормозных колодок;
- микрочастиц контактного провода и токосъемных пластин токоприемника.

Распределение загрязнений в балласте предполагается равномерным. При расчетах принимается, что загрязняющие вещества образуют равномерный слой на поверхности каждой частицы щебня, который можно представить в виде условной сферы. Толщина загрязняющего слоя на поверхности частиц щебня является важным параметром, учитываемым при оценке электрических характеристик балластного слоя, которая рассчитывается по формуле, м:

$$h_3 = (k_V + 1)^{\frac{1}{3}} \cdot r_c, \quad (10)$$

где  $k_V$  – отношение объемов загрязнения к объему сферы;

$r_c$  – радиус условной сферы для расчета поверхностной проводимости, м.

Удельная поверхностная проводимость условной сферы от слоя загрязнения и слоя воды рассчитывается по формуле, См:

$$G_{з.в} = \frac{1}{\frac{h_3}{r_3}} + G_B, \quad (11)$$

где  $r_3$  – удельное сопротивление материала засорения, Ом·м.

Определение удельного объемного сопротивления балластного слоя как однородной среды требует предварительного расчета пустотности балластной призмы:

$$V_{б.п} = \frac{\rho_б}{\rho_п}, \quad (12)$$

где  $\rho_б$  – объемная плотность балласта, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_п$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>.

Основание балластной призмы, м,

$$O_{б.п} = 1,6 \cdot 2 + \frac{i_{б.п.}}{h_б}, \quad (13)$$

где  $i_{б.п}$  – уклон балластной призмы, %;

$h_б$  – высота балласта, м.

Давление от шпалы, МПа,

$$P_{ш} = 9,81 \cdot \frac{m_{ш}}{O_{б.п} \cdot L_{ш}}, \quad (14)$$

где  $m_{ш}$  – масса шпалы с рельсами, кг;

$L_{ш}$  – эпюра шпал, м.

Давление от веса балласта, МПа,

$$P_б = 9,81 \cdot \rho_б \cdot h_б \cdot 0,5 \cdot (L_о \cdot 2 + O_{б.п}) \cdot \frac{1}{O_{б.п}}, \quad (15)$$

где  $L_о$  – расстояние от оси пути до края балластной призмы, м;

$\rho_б$  – объемная плотность балласта, кг/м<sup>3</sup>.

Суммарное среднее давление, МПа,

$$P_о = P_{ш} + P_б. \quad (16)$$

Площадь проекции куска в балласте, м<sup>2</sup>,

$$S_{ш} = h_{ш}^2 \cdot V_{б.п}. \quad (17)$$

Радиус пятна контакта в точке, м,

$$r_{п} = \sqrt{\frac{P_{ш}}{\frac{\sigma_c}{\pi}}} + h_з + h_в, \quad (18)$$

где  $\sigma_c$  – предел прочности на сжатие, Н/м<sup>2</sup>.

При анализе состояния балластного слоя проводится комплексный расчет, учитывающий несколько важных параметров. Во-первых, рассматривается переходное сопротивление касания щебня от объемной проводимости с учетом загрязнения, Ом:

$$R_{о.з} = \frac{R_{ш}}{2 \cdot r_{п}}. \quad (19)$$

Во-вторых, принимается во внимание переходное сопротивление касания щебня от поверхностной проводимости с учетом загрязнения, Ом:

$$R_{п.з} = \frac{1}{\frac{G_з}{\pi}} \cdot \ln \left( \sqrt{1 + \frac{R_S \cdot h_{ш}^2 - r_{п}^2}{r_{п}^2}} + \sqrt{\frac{R_S \cdot h_{ш}^2 - r_{п}^2}{r_{п}^2}} \right). \quad (20)$$

И, наконец, учитывается наличие водяного слоя на поверхности частиц щебня, что значительно влияет на электрические свойства материала. Расчет итогового сопротивления куска щебня осуществляется по формуле (9).

Поскольку щебень условно рассматривается как совокупность фрагментов отдельных частиц балласта (отдельных камешков), можно определить удельное сопротивление балласта с учетом загрязнения путем умножения суммарного сопротивления отдельного куска щебня на его размер, Ом·км:

$$R_{\sigma} = R_{\text{общ}} \cdot h_{\text{ш}}. \quad (21)$$

Графическое представление зависимости, отображающее изменение удельной электрической проводимости балласта от величины водяного слоя, представлено на рисунке 6.

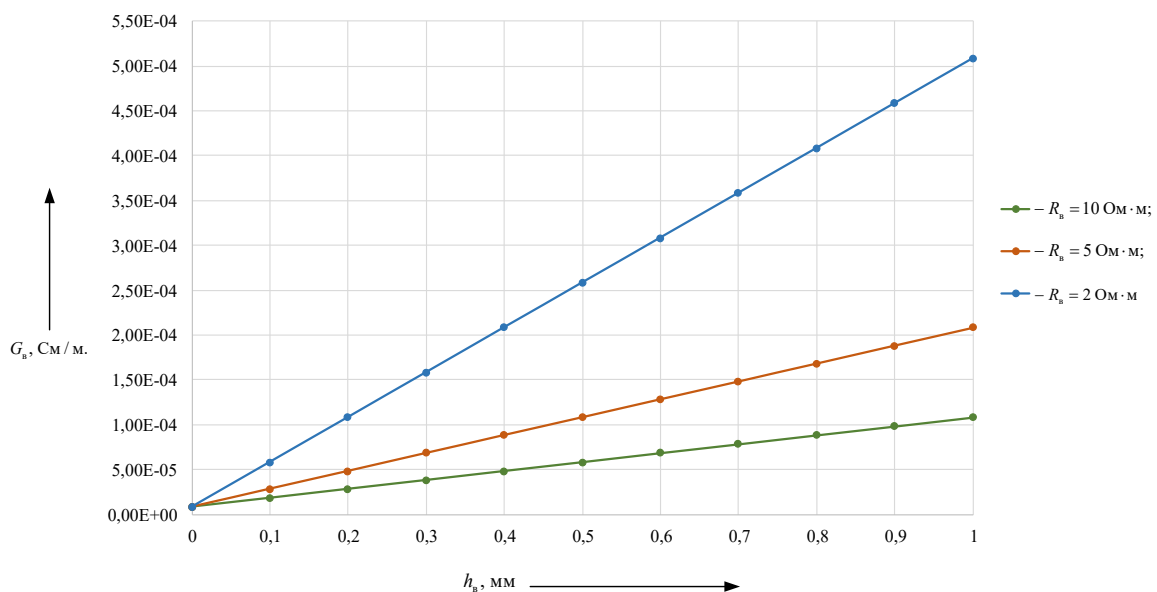


Рисунок 6 – График зависимости удельной электрической проводимости балласта как однородной среды от толщины слоя воды

Методика расчета включает в себя несколько ключевых моментов. Сначала определяется объемная концентрация засорителей в порах материала. Затем учитывается удельное сопротивление различных типов загрязнений. После этого проводится анализ влияния водяного слоя на электрические характеристики балласта. Особенности загрязнения проявляются по-разному в зависимости от типа загрязнителей [10]. Легкоподвижные материалы, такие как угольная пыль и металлические опилки, проникают в нижние слои балластной призмы. Крупные частицы, например, торф и другие сыпучие материалы, преимущественно скапливаются в верхних слоях. При этом водная пленка, образующаяся на поверхности частиц, увеличивает общую проводимость материала. Такая комплексная оценка всех факторов позволяет точно определить текущее состояние балластного слоя и его электрические характеристики.

В настоящее время представленная методика является наиболее совершенным инструментом для оценки состояния балластного слоя. Важно понимать, что данная модель носит приближенный характер и отражает реальную ситуацию с определенной степенью точности. Приближенность модели обусловлена сложностью процессов, происходящих в балластном слое, включая неравномерное распределение засорителей, переменную влажность и динамические нагрузки от проходящих поездов. Преимущества методики заключаются в том, что она учитывает основные факторы, влияющие на состояние балласта.



## Список литературы

1. Приказ Минтранса России от 23.06.2022 № 250 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» (зарегистрирован в Минюсте России 20.07.2022 № 69324) // [www.garant.ru](http://www.garant.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://base.garant.ru/405042985/> (дата обращения: 25.06.2025).
2. Смолин, П. И. Исследование модели растекания тока по рельсовым нитям на безбалластном пути в системе тягового электроснабжения / П. И. Смолин, И. А. Ребров. – Текст : непосредственный // Железная дорога: путь в будущее : сборник материалов междунар. науч. конф. аспирантов и молодых ученых, Москва, 28–29 апреля 2022 г. / Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. – Москва, 2022. – С. 176–182. – EDN SBCBQJ.
3. Третьяков, В. А. Разработка модели распределения потенциала и растекания тока в поперечном сечении пути / В. А. Третьяков, А. В. Паранин. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2024. – № 4 (83). – С. 100–105. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-4-100-105. – EDN UNMOLF.
4. Определение переходного сопротивления между рельсом и землей для безбалластного пути и влияние сопротивления на растекание токов утечки в земляном полотне / А. Б. Косарев, Р. А. Рудашевский, А. В. Рудашевская [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81. – № 1. – С. 7–15. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-7-15. – EDN WOROCO.
5. Косарев, А. Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта : сборник трудов ВНИИЖТ / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев ; Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. – Москва : Интекст, 2008. – 480 с. – (Труды ВНИИЖТ). – Текст : непосредственный. – EDN VMEQBZ.
6. Горенбейн, Е. В. Определение, методы измерения и контроля первичных параметров рельсовой линии / Е. В. Горенбейн. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 4. – С. 37–47. – EDN MWLZDB.
7. Мышкин, Н. К. Электрические контакты: профессиональное учебно-справочное руководство / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный : Интеллект, 2008. – 560 с. – Текст : непосредственный.
8. Оптимизация ремонтов пути с глубокой очисткой балласта / В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, К. М. Ермолов, В. А. Явна. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 12. – С. 25–30. – EDN VHQQZ.
9. Определение засоренности балластного материала железнодорожного пути методом георадиолокации / В. А. Явна, В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, К. М. Ермолов. – Текст : непосредственный // Инженерные изыскания. – 2015. – № 10-11. – С. 60–65. – EDN VHEESZ.
10. Колос, А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути / А. Ф. Колос. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19. – № 3. – С. 558–575. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575. – EDN SZPEJX.

## References

1. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 23, 2022 No. 250 «On Approval of the Rules for Technical Operation of Railways of the Russian Federation» (registered with the Ministry of Justice of Russia on July 20, 2022 No. 69324). Available at: <https://base.garant.ru/405042985/> (accessed 25.06.2025). (In Russian).
2. Smolin P.I., Rebrov I.A. [Investigation of a current-spreading model along the trackway of a ballastless track in a traction power system]. *Zheleznaia doroga: put' v budushchee : sbornik materialov mezhdunarodnoĭ nauchnoĭ konferentsii aspirantov i molodykh uchenykh* [Railway: The Path to the Future. Collection of Materials of the I International Scientific Conference of Postgraduate Students and Young Scientists]. Moscow, 2022, pp. 176-182. EDN SBCBQJ. (In Russian).

3. Tretyakov V.A., Parani A.V. Development of model of potential distribution and current flow in the cross-section of the track. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2024, no. 4 (83), pp. 100-105. DOI 10.20291/1815-9400-2024-4-100-105. EDN UNMOLF. (In Russian).
4. Kosarev A.B., Rudashevskiy R.A., Rudashevskaya A.V., Smolin P.I., Rebrov I.A. Determination of the rail-to-earth transition resistance of the ballastless track and influence of the resistance on the current spreading in the subgrade. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2022, vol. 81, no. 1, pp. 7-15. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-7-15>. EDN WOROCO. (In Russian).
5. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Fundamentals of electromagnetic safety of railway power supply systems. Moscow, Intext Publ., 2008, 480 p. EDN VMEQBZ. (In Russian).
6. Gorenbein E.V. Determination, measurement methods and control of primary parameters of the rail line. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology in Transport*, 2010, no. 4, pp. 37-47. EDN MWLZDB. (In Russian).
7. Myshkin N.K., Konchits V.V., Braunovich M. *Elektricheskie kontakty: professional'noe uchebno-spravochnoe rukovodstvo* [Electrical Contacts: a professional educational reference guide]. Dolgoprudny, Intellect Publ., 2008, 560 p. (In Russian).
8. Shapovalov V.L., Morozov A.V., Ermolov K.M., Yavna V.A. Improving deep ballast cleaning works during the railway track repairs. *Put' i putevoe khoziaistvo – Railway Track and Facilities*, 2015, no. 12, pp. 25-30. EDN VHQQZ. (In Russian).
9. Yavna V.A., Shapovalov V.L., Morozov A.V., Ermolov K.M. Determination of clogging of railway ballast material by ground penetrating radar. *Inzhenernye izyskaniia – Engineering survey*, 2015, no. 10-11, pp. 60-65. EDN VHEESZ. (In Russian).
10. Kolos A. Clogging and pollution of broken stone ballast during railway track exploitation. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg transport university*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 558-575. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-3-558-575>. EDN SZPEJX. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Третьяков Владислав Артёмович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7 (950) 558-18-60.

E-mail: vladislav.tretyakov@mail.ru

### Паранин Александр Викторович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7 (902) 265-23-26.

E-mail: aparaniin@usurt.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Третьяков, В. А. Определение переходного сопротивления в местах контакта щебня с рельсом / В. А. Третьяков, А. В. Паранин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 14 – 25.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Tretyakov Vladislav Artemovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department “Electric Power Supply of Transport”, USURT.

Phone: +7 (950) 558-18-60.

E-mail: vladislav.tretyakov@mail.ru

### Parani Alexander Viktorovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department “Electric Power Supply of Transport” USURT.

Phone: +7 (902) 265-23-26.

E-mail: aparaniin@usurt.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tretyakov V.A., Parani A.V. Determination of the transient resistance at the points of contact of the crushed stone with the rail. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 14-25. (In Russian).

Е. И. Баканова, Е. А. Булаев, В. Л. Незевак

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПРИ РАЗВИТИИ СЕТИ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

**Аннотация.** В статье рассматривается задача оценки влияния работы зарядных станций на показатели графиков нагрузки трансформаторных подстанций. Решение задачи выполнено на примере объектов, проходящих опытную эксплуатацию в автомобильном хозяйстве железнодорожного транспорта. Параметры зарядной станции и аккумуляторной батареи электротранспорта использованы для варианта медленной зарядки на основе зарядной станции переменного тока и аккумуляторной батареи с номинальным напряжением 346 В и энергоемкостью 48 кВт·ч. Для оценки влияния работы зарядной станции рассмотрены результаты опытной эксплуатации электромотоцикла. Оценка выполнена для ряда показателей графиков нагрузки. Для рассмотрения и оценки динамических процессов, наблюдающихся при работе зарядной станции, разработана имитационная модель, содержащая управляемый выпрямительный преобразователь и ограничитель тока заряда, реализованный с помощью широтно-импульсного регулирования. В модели зарядной станции реализовано регулирование по уровню напряжения и тока, которые определяются на основе заводских характеристик. Полученные результаты могут быть использованы для оценки показателей графиков трансформаторных подстанций при расширении зарядной инфраструктуры, оценки показателей качества электроэнергии для различных схемных решений, применяемых при регулировании напряжения и тока заряда, разработки мероприятий по управлению спросом в процессах заряда электротранспорта, а также разработки рекомендаций по обеспечению показателей качества электроэнергии. Результатами работы являются оценка влияния работы зарядной станции на показатели графика нагрузки трансформаторной подстанции и имитационная модель зарядной станции для отработки алгоритмов регулирования, протоколов зарядки аккумуляторных батарей и схемных решений для процессов выпрямления и инвертирования тока.

**Ключевые слова:** система нетягового электроснабжения, трансформаторная подстанция, график нагрузки, зарядная станция, электротранспорт, аккумуляторная батарея, управляемый выпрямитель, регулятор тока, напряжение заряда.

Elena I. Bakanova, Egor A. Bulaev, Vladislav L. Nezevak

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## EVALUATION OF LOAD GRAPH INDICATORS TRANSFORMER SUBSTATIONS IN THE DEVELOPMENT OF THE NETWORK ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS

**Abstract.** The article considers the problem of assessing the impact of charging stations on the load schedules of transformer substations. The solution of the problem is based on the example of facilities undergoing trial operation in the automotive sector of railway transport. The parameters of the electric vehicle charging station and battery are used for a slow charging option based on an AC charging station and a battery with a rated voltage of 346 V and an energy consumption of 48 kWh. To assess the impact of the charging station operation, the results of the trial operation of an electric vehicle are considered. The assessment was performed for a number of load graph indicators. To consider and evaluate the dynamic processes observed during the operation of the charging station, a simulation model has been developed containing a controlled rectifier converter and a charge current limiter implemented using pulse width regulation. The charging station model has voltage and current level control, which are determined based on factory specifications. The results obtained can be used to evaluate the performance of transformer substation schedules when expanding the charging infrastructure, evaluate electricity quality indicators for various circuit solutions used to regulate charge voltage and current, develop demand management measures in electric vehicle charging processes, and develop recommendations for ensuring electricity quality indicators. The results of the work are an assessment of the effect of the charging station operation on the load schedule of the transformer substation, a simulation model of the charging station for testing control algorithms, battery charging protocols and circuit solutions for current rectification and inversion processes.

**Keywords:** non-traction power supply system, transformer substation, load schedule, charging station, electric transport, rechargeable battery, controlled rectifier, current regulator, charge voltage.

Развитие электротранспорта обусловлено необходимостью поиска решений в области повышения эффективности перевозок, сокращения потребления первичного топлива и выбросов углерода в окружающую среду [1]. Железнодорожный транспорт по специфике своей деятельности, связанной с необходимостью доставки сотрудников и материалообеспеченности по всей сети железных дорог, использует автотранспорт. В настоящее время реализация технической политики в области автотранспорта, разработка структуры автопарка и подготовка отраслевых нормативных документов выполняются Центром управления автотранспортом (ЦАТом) ОАО «РЖД». В опытной эксплуатации компании на сегодняшний день находится несколько единиц электротранспорта [2]. По результатам опытной эксплуатации будет выполнена комплексная оценка эффективности электротранспорта на железных дорогах с учетом соответствия требованиям компании, удобства, комфорта и достаточности зарядной инфраструктуры [3]. Одним из аспектов опытной эксплуатации является функция зарядки электромобилей, которая может выполняться от собственных зарядных станций, подключенных к трансформаторным подстанциям энергетического комплекса железнодорожного транспорта. В связи с этим повышение эффективности работы энергетического комплекса железнодорожного транспорта при появлении нового типа нагрузки относится к актуальным задачам.

Зарядные станции (ЗС) для электротранспорта классифицируются по ряду признаков:

- род тока;
- количество фаз (для переменного тока);
- скорость зарядки (в зависимости от мощности);
- проводная или беспроводная зарядка;
- удаленность транспорта для беспроводной технологии (ближне-, средне- и дальне-польные зарядки);
- другие виды технологий для зарядки (замена аккумулятора, индуктивная, емкостная, магниторезонансная, микроволновая, радиоволновая, лазерная и др. [4]).

Классификация зарядных станций приведена на рисунке 1.

В настоящее время основное деление зарядных станций выполняется по принципам наличия или отсутствия электрического контакта и по уровню мощности и роду тока. В первом случае решаются задачи повышения удобства зарядки (без использования силового кабеля), во втором – увеличения скорости заряда аккумуляторной батареи (АКБ). Отдельно выделяют способы восстановления емкости, связанные с заменой разряженной АКБ на заряженную, а также применение в ЗС двунаправленных преобразователей, которые позволяют преобразовывать постоянное напряжение АКБ в переменное для передачи мощности во внешнюю сеть.

Структура ЗС аналогична зарядно-подзарядным устройствам, используемым на объектах электроэнергетики, в промышленности и на транспорте. ЗС постоянного тока (DC) содержат трансформатор, преобразователь и фильтр. Регулирование тока и напряжения осуществляется по коммуникационному каналу с электромобилем, АКБ которого предусматривает реализацию зарядки по одному из известных алгоритмов при постоянных напряжении и токе зарядки или при реализации модифицированных способов (например, алгоритмы зарядки CC, CV или CC/CV).

Подключение зарядных станций к электрической сети выполняется от трансформаторных подстанций, как правило, на напряжении 380/220 В. Рядом исследователей предлагаются варианты по применению энергоустройств, позволяющие регулировать нагрузочный режим в нормальном и аварийном режимах, например, как это показано в работе [5]. Работа зарядных станций электромобилей оказывает влияние на график нагрузки трансформаторных подстанций и на качество электроэнергии, в первую очередь на несинусоидальность, что связано с применением преобразователей, работающих в выпрямительном и инверторном режимах [6, 7]. В условиях роста нагрузки со стороны зарядных станций и широкого

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

распространения данного вида транспорта одновременная постановка на заряд и снятие с зарядки электромобилей может оказывать влияние на уровень напряжения в распределительных сетях населенных пунктов [8]. В настоящее время ведется достаточно большое количество исследований в области повышения эффективности работы зарядной инфраструктуры для электромобилей в направлении повышения качества электроэнергии и энергоэффективности, сохранения ресурса аккумуляторов, выравнивания графика нагрузки элементов электрических сетей, использования электрических станций на основе возобновляемых источников энергии и ряда других [9, 10].

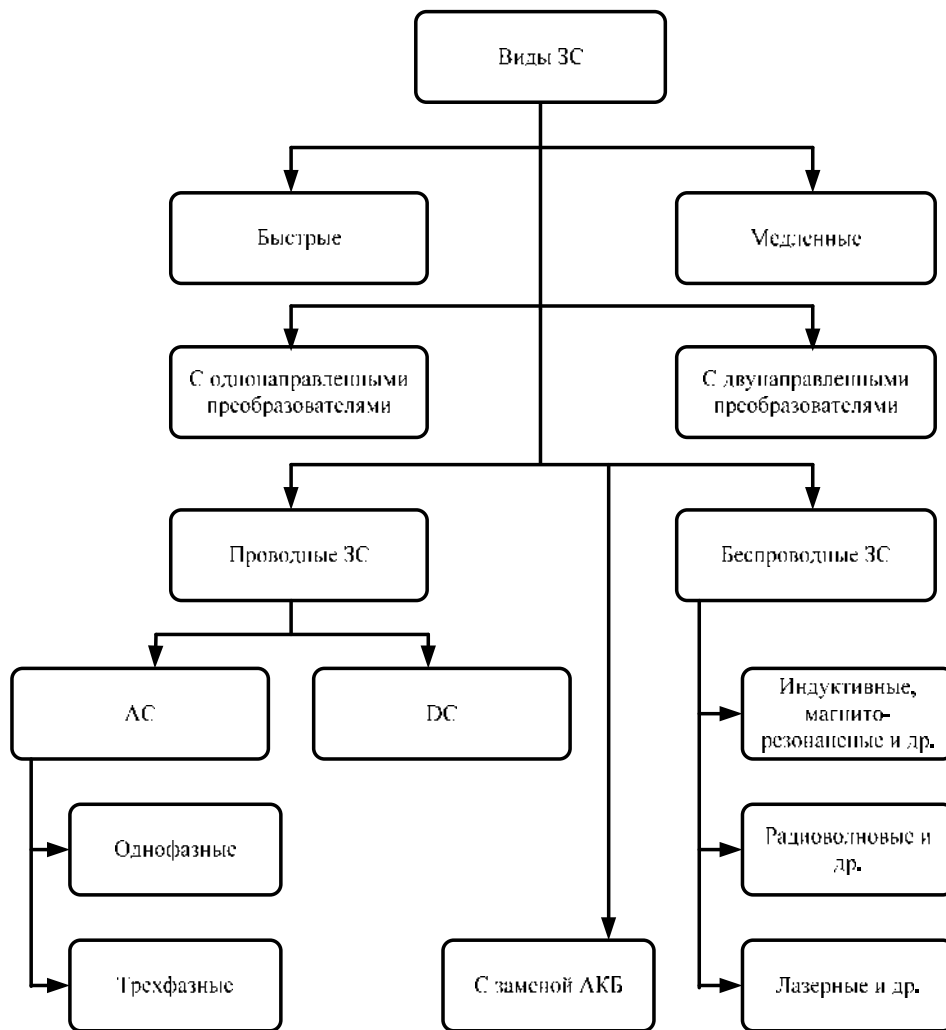


Рисунок 1 – Классификация зарядных станций для электромобилей

Условия работы электромобилей на железнодорожном транспорте зависят от вида деятельности и режима работы предприятий, эксплуатирующих электромобили: среднесуточный пробег, время выезда/возвращения, средняя скорость движения, полный и удельный расход электроэнергии.

На примере результатов эксплуатации электромобиля на Западно-Сибирской железной дороге (электромобиль серии NextElectro с АКБ энергоемкостью 48 кВт·ч) можно оценить основные энергетические показатели, к которым относятся расход электроэнергии за поездку, удельный расход, средняя мощность заряда, степень заряженности при возвращении, продолжительность заряда в зависимости от пробега. В процессе эксплуатации электромобиль не относился к аварийно-восстановительным средствам, его статистические показатели за 2024 г. приведены на рисунке 2.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

По результатам эксплуатации средний удельный расход электромобиля  $w$  за год составил 42,6 кВт·ч / 100 км, при этом наблюдается снижение удельного расхода при увеличении пробега (рисунок 2, *а*). Средняя мощность  $P_3$ , потребляемая зарядной станцией (номинальная мощность 22 кВт) при зарядке электромобиля, составила 5,3 кВт (рисунок 2, *б*), а среднее потребление электроэнергии при зарядке – 14,1 кВт (рисунок 2, *в*). Средняя степень заряженности по окончании поездок  $SoC_k$  по итогам года составила 64,7 %, закономерно уменьшаясь по мере увеличения пробега, при этом среднее время заряда АКБ составило 2,7 ч (рисунки 2, *г* и 2, *д* соответственно). В ряде случаев выезды электромобиля осуществлялись при заряженности АКБ  $SoC_n < 100$  %, в связи с этим график по оси абсцисс отклоняется от значения 100, носит падающий характер, соответственно  $SoC_n$  снижается и  $SoC_k$  (рисунок 2, *е*).

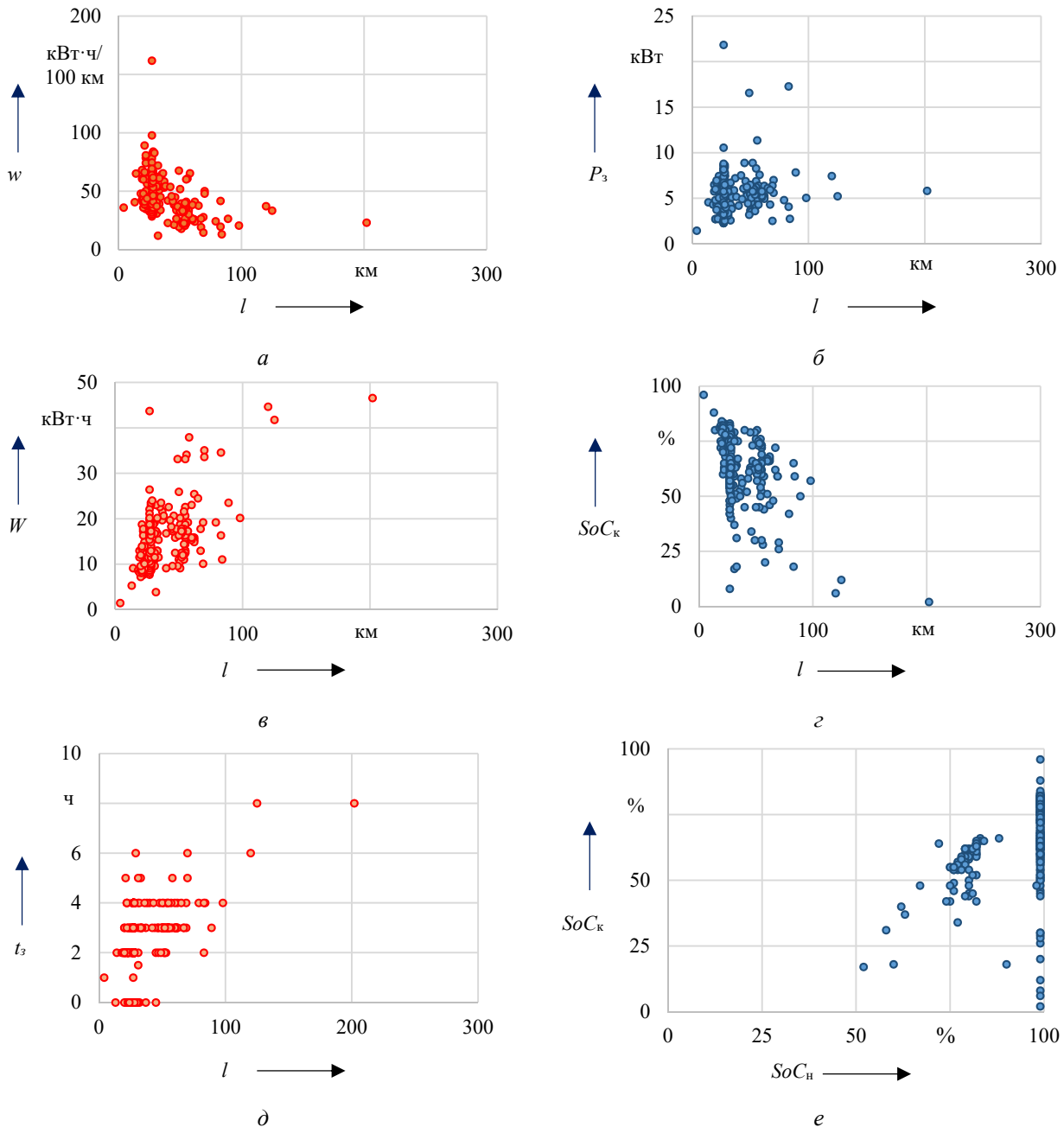


Рисунок 2 – Энергетические показатели электромобиля при опытной эксплуатации:

*а* – удельный расход электроэнергии; *б* – мощность заряда – пробег; *в* – расход электроэнергии – пробег; *г* – степень заряженности при возвращении – пробег; *д* – среднее время заряда – пробег, *е* – средняя степень заряженности при возвращении – при выезде

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Результаты эксплуатации позволяют оценить следующие показатели работы зарядных станций для рассматриваемых условий эксплуатации электромобиля: время начала и продолжительность зарядки, мощность зарядки, объем электроэнергии. Указанные показатели оказывают влияние на показатели загрузки трансформаторных подстанций, от которых присоединены зарядные станции.

Распределение для времени начала и окончания зарядки по итогам года приведено на рисунке 3. Наибольшая плотность вероятности для времени зарядки  $p_{н.з}$  для рассматриваемых условий эксплуатации электромобиля отмечается в первой половине дня для времени 09:00 (34,6 %), для второй половины дня – 19:00 (19,8 %). Плотность вероятности для фиксируемого времени окончания распределяется аналогично: для соответствующего времени начала зарядки в первой половине дня максимальное значение плотности вероятности окончания зарядки  $p_{к.з}$  соответствует времени 13:00 (14,2 %), для времени начала зарядки во второй половине дня – 21:00 (16,7 %). Указанное время указывает два наиболее вероятных сценария для начала и окончания зарядки (в первой и второй половине дня) и позволяет сформировать график нагрузки для ЗС, обеспечивающих зарядку электромобилей для рассматриваемых условий работы.

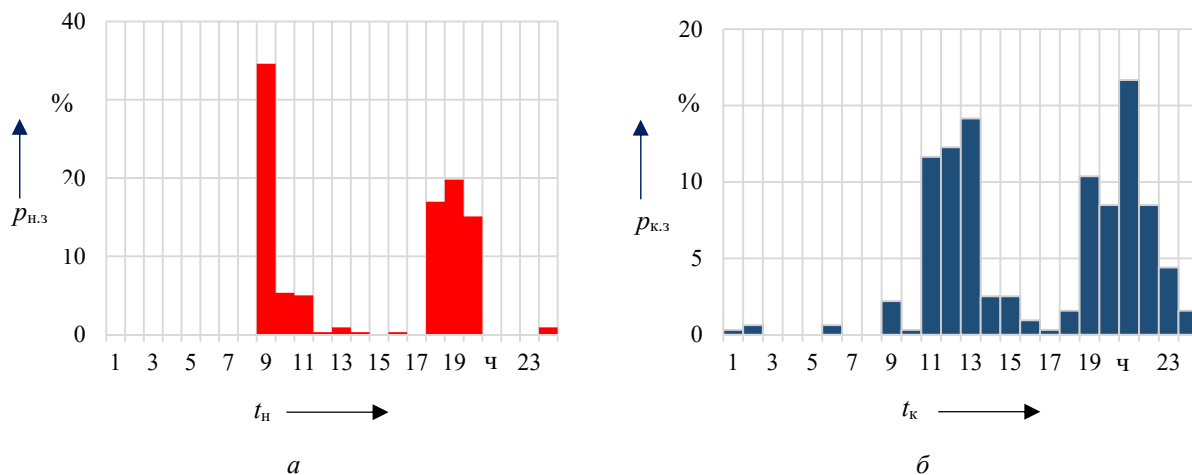


Рисунок 3 – Распределение времени для начала (а) и окончания (б) зарядки

Процесс зарядки электромобиля оказывает влияние на показатели графика нагрузки трансформаторной подстанции. С целью оценки данного влияния рассмотрены основные коэффициенты графика нагрузки, расчет которых приведен ниже.

Коэффициент заполнения графика активной мощности определяется по отношению средней активной мощности  $P_{ср}$  к максимальной  $P_{макс}$  за отчетный период:

$$k_3 = \frac{P_{ср}}{P_{макс}}. \quad (1)$$

Коэффициент использования определяется как отношение максимальной нагрузки, которая может быть потреблена, к номинальной мощности  $P_{ном}$  оборудования:

$$k_{и} = \frac{P_{ср}}{P_{ном}}. \quad (2)$$

Коэффициент максимума активной мощности рассчитывается как отношение максимальной активной мощности к средней за отчетный период:

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$k_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}} \quad (3)$$

Коэффициент минимума определяется как отношение минимальной нагрузки  $P_{\text{ном}}$  к максимальной за отчетный период:

$$k_{\min} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (4)$$

При наложении средней мощности, потребляемой ЗС, на мощность трансформаторной подстанции показатели графика будут изменяться. Степень изменения показателей будет определяться сложившимися показателями графиков нагрузки, номинальной мощностью трансформаторов подстанции и количеством зарядных станций. Для определения характера изменения рассмотренных выше показателей выполнены расчеты для изменения показателей равномерного графика нагрузки с различной номинальной мощностью силовых трансформаторов в диапазоне от 40 до 1000 кВ·А. Результаты расчетов для коэффициентов графика нагрузки (использования, заполнения, максимума и минимума) для базового варианта с равномерным графиком и варианта работы ЗС приведены на рисунке 4. Влияние на рассмотренные показатели графика нагрузки (1) – (4) для циклической нагрузки ЗС (см. рисунок 3) снижается по мере роста номинальной мощности трансформаторов и приближается к значениям показателей для базовых вариантов и, наоборот, по мере снижения номинальной мощности показатели графиков ухудшаются.

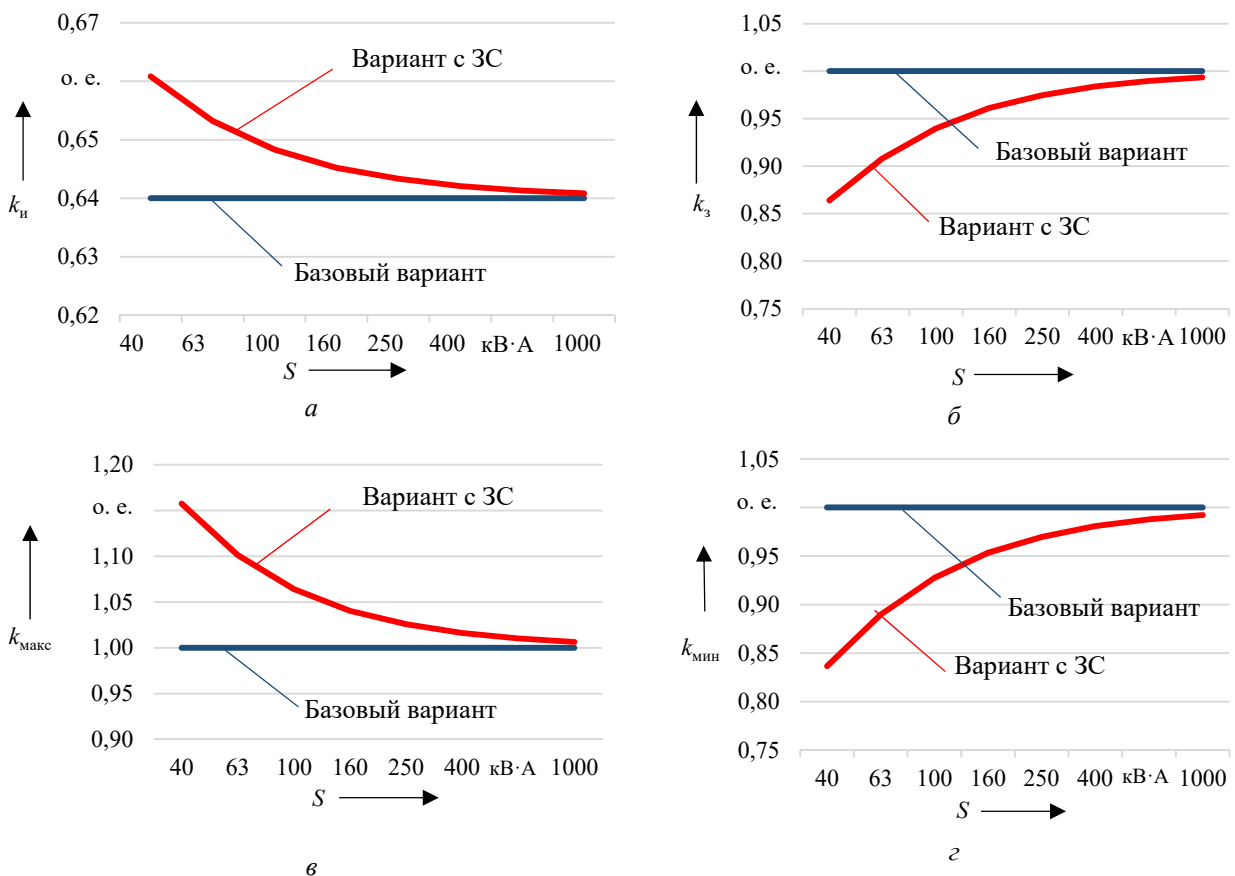


Рисунок 4 – Коэффициенты для графика равномерной нагрузки: коэффициент использования (а), заполнения (б), максимума (в) и минимума (г)



Существует ряд схемных решений для зарядных станций, использующих схемы выпрямления и инвертирования на различной элементной базе. Для зарядных станций переменного тока используются управляемые выпрямители и схемы ограничения тока, для зарядных станций постоянного тока применяются схемы управляемых выпрямителей. Непосредственно заряд АКБ электротранспортного средства производится на основе внутренних систем преобразования и регулирования процессов заряда.

В настоящее время наибольшее распространение в России получили зарядные станции переменного тока, количество и доля которых варьируются по регионам. Опытная эксплуатация электротранспорта в ОАО «РЖД» производится с использованием зарядных станций переменного тока, относящихся к виду медленной зарядки. Реализация схем медленной зарядки связана с использованием управляемых выпрямителей, позволяющих регулировать уровень напряжения на шинах постоянного тока, а также ограничителей тока в соответствии с параметрами и протоколами заряда АКБ.

Для оценки показателей работы зарядных станций, присоединенных к трансформаторным подстанциям, рассмотрим схему, содержащую внешний источник напряжения, подключенный к линии электропередачи, трансформаторную подстанцию и зарядную станцию, содержащую разделительный трансформатор, управляемый выпрямитель и регулятор тока заряда АКБ. В качестве аккумуляторной батареи рассматривается батарея с номинальным напряжением 350 В и емкостью 132 А·ч, что эквивалентно энергоемкости на уровне 48 кВт·ч, что соответствует энергоемкости автомобилей Next Electro, находящихся в ОАО «РЖД» в опытной эксплуатации.

Структурная схема подключенных к трансформаторной подстанции ЗС и АКБ электромобиля приведена на рисунке 5.

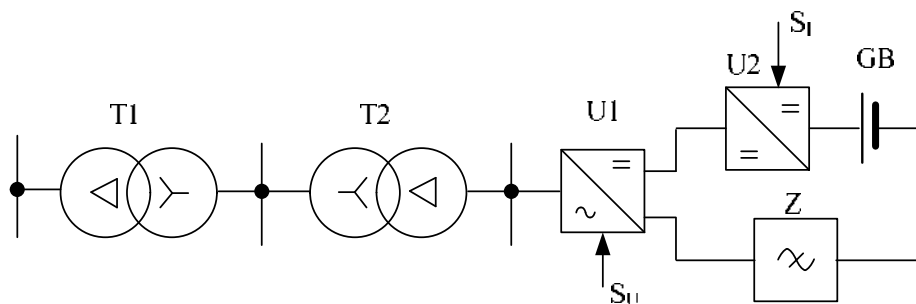


Рисунок 5 – Структурная схема подключения зарядной станции и электротранспорта

Питание ЗС осуществляется от силового понижающего трансформатора T1, подключенного со стороны высшего напряжения (ВН) к сети напряжением 10 кВ. От шин 380 В низшего напряжения (НН) T1 подключен разделительный трансформатор T2 с напряжением ВН/НН – 380/380 В. От шин НН трансформатора T2 подключен управляемый выпрямитель U1, регулирующий уровень напряжения от сигнала управления Su. В цепь заряда АКБ (GB) включены преобразователь постоянного тока, предназначенный для ограничения тока, задаваемого сигналом управления Si, и фильтр тока Z.

В соответствии с приведенной на рисунке 5 схемой разработана имитационная модель в программной среде SimInTech, позволяющая выполнить моделирование процессов заряда. Схема модели, состоящей из субмоделей (трансформаторная подстанция, разделительный трансформатор, АКБ, САР тока, САР напряжения), реализованная в SimInTech и приведенная на рисунке 6.

Регулирование уровня выпрямленного напряжения осуществляется с помощью управляемого трехфазного выпрямителя, выполненного по мостовой схеме выпрямления с использованием тиристоров (рисунок 7).

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

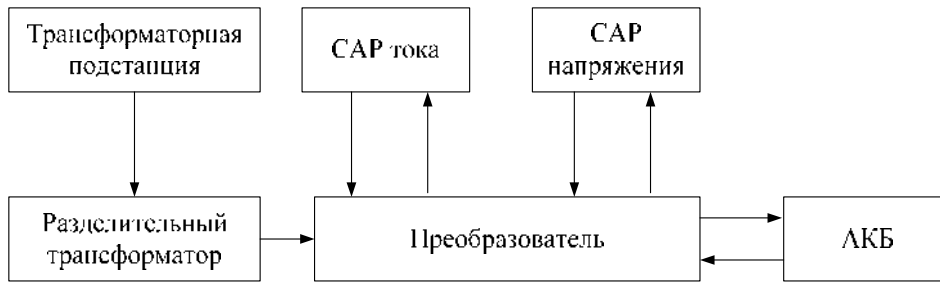


Рисунок 6 – Структурная схема имитационной модели «подстанция – зарядная станция»

Регулирование угла открытия реализовано с помощью системы автоматического регулирования напряжения, построенной на основе функциональной схемы управления с обратной связью. Угол открытия тиристоров зависит от отклонения измеренного среднего значения напряжения на выходе управляемого выпрямителя от заданного опорного напряжения. Управляющий сигнал формируется с помощью функционального блока, связывающего уровень среднего выпрямленного напряжения с углом управления тиристоров, и ПИД-регулятора, обеспечивающего поддержание уровня выпрямленного напряжения.

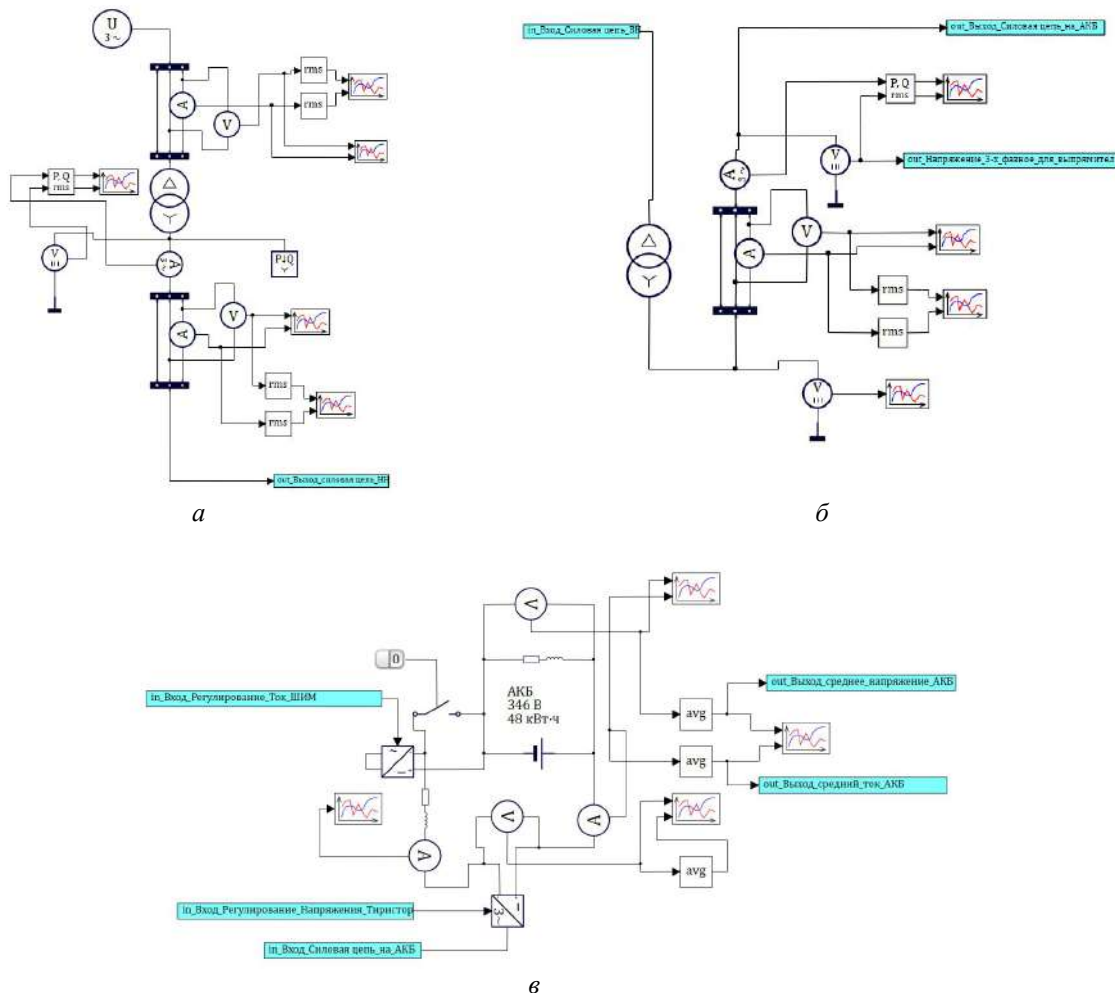


Рисунок 7 – Схема имитационной модели подключенной зарядной станции и электротранспорта:  
 а – трансформаторная подстанция; б – разделительный трансформатор; в – зарядная станция и аккумулятор

Процесс зарядки АКБ электромобилей определяется протоколами зарядки, где используются режимы заряда постоянным напряжением, постоянным током или комбинацией указанных режимов. Помимо уровня напряжения в процессе заряда следует контролировать и

средний ток заряда АКБ электромобилей. Система автоматического регулирования реализована на основе функциональной схемы с обратной связью, где средний ток зарядки регулируется с помощью широтно-импульсного преобразователя, управляемого с помощью ПИД-регулятора.

Тиристорное регулирование напряжения и регулирование тока с помощью IGBT-транзисторов на основе широтно-импульсной модуляции выполняется двумя соответствующими ПИД-регуляторами. Настройки ПИД-регуляторов предварительно определены на основе эвристического метода Циглера – Никольса и уточнены в ходе имитационного моделирования. Результаты приведены для следующих настроек ПИД-регуляторов: для управления уровнем напряжения и тока соответственно пропорциональная составляющая равна 1,5 и 0,9, интегральная – 0,75 и 0,25, дифференциальная – 0,5 и 0,025, постоянная времени дифференцирования – 0,01 с в обоих случаях.

Имитационная модель позволяет реализовать протоколы зарядки постоянным током и напряжением, их комбинацией, а также построить график нагрузки трансформаторной подстанции, обеспечивающей работу ЗС, присоединенной к ней. Указанная возможность позволяет перейти к реализации механизма управления спросом, в котором координируется работа нескольких зарядных станций с целью оптимизации загрузки распределительной электрической сети.

Фрагмент моделирования работы ЗС приведен на рисунке 8, где показаны графики уровня напряжения и тока АКБ в режиме заряда. Опорный уровень тока задан для системы автоматического регулирования на уровне 20 А (рисунок 8, *а*), опорный уровень напряжения – 346 В. Активная и реактивная мощность, потребляемая ЗС при заряде АКБ электромобиля на постоянном напряжении с ограничением тока заряда, приведена на рисунке 8, *б*, где в установившемся режиме потребляемая активная мощность составляет 7,5 кВт, реактивная – 2,7 квар. Полученные результаты моделирования нагрузки ЗС позволяют перейти к совместному моделированию суммарного графика нагрузки трансформаторной подстанции. Приведенное на графиках напряжения и тока, а также активной и реактивной мощности (см. рисунок 8) время моделирования соответствует реальному времени.

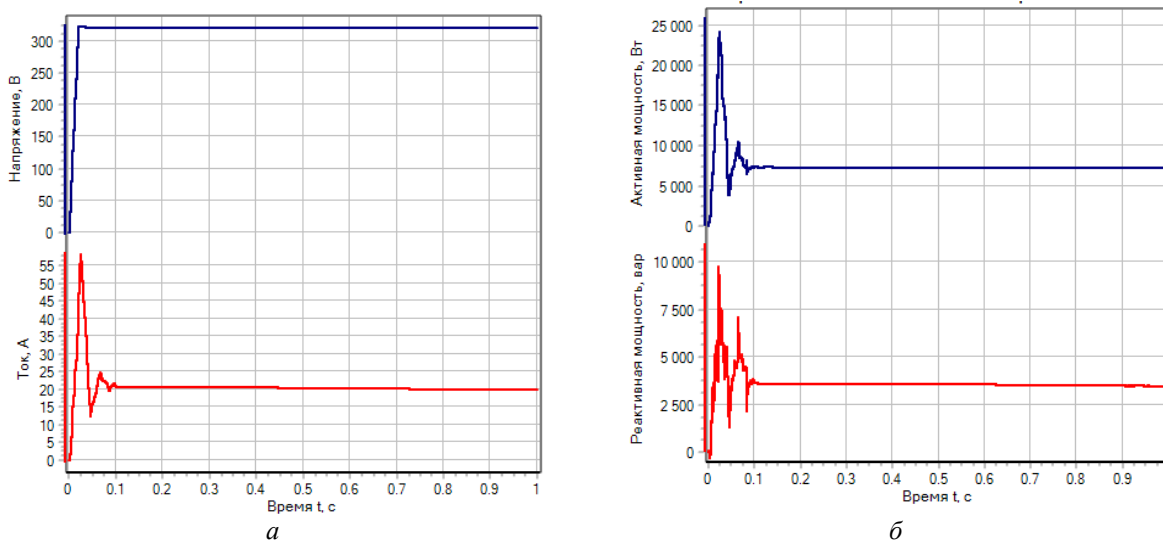


Рисунок 8 – Графики показателей работы зарядной станции при заряде: *а* – напряжения и тока аккумуляторной батареи; *б* – активной и реактивной мощности (построены в программной среде Simintech)

Полученные результаты корреспондируют с номинальной мощностью и энергетическими показателями рассмотренных ЗС переменного тока и результатами аналогичных исследований, позволяющих оценить потребляемую при зарядке мощность и показатели графика нагрузки, например, как это показано в работах [4, 8, 9].

Рассмотренные выше временные интервалы начала и окончания заряда электромобиля позволяют обозначить наличие двух циклов работы (дневной и вечерний), интервалы времени которого определяются спецификой работы предприятий железнодорожного транспорта, носящей в данном случае сменный характер. Масштабирование проекта по применению электромобилей на железнодорожном транспорте приведет к возрастанию в графике нагрузки доли зарядных станций, управление спросом на электроэнергию со стороны которых позволяет оптимизировать работу энергетического комплекса.

Таким образом, развитие собственной сети зарядных станций при расширении парка электромобилей будет оказывать влияние на показатели графика нагрузки, степень влияния на которые определяется сложившейся нагрузкой потребителей и режимом работы электромобилей на предприятиях железнодорожного транспорта. Рассмотренные статистические данные указывают на наиболее вероятные сценарии зарядки, совпадающие с дневным и вечерним максимумом нагрузки, что при развитии парка электромобилей обуславливает применение медленных зарядных станций, а также необходимость разработки мероприятий и алгоритмов управления спросом на электроэнергию со стороны зарядных станций. Предложенная имитационная модель позволяет получить оценку влияния зарядной инфраструктуры на график нагрузки трансформаторных подстанций, показатели качества электроэнергии на основе моделирования для различных сценариев зарядки (CC, CV, CV/CC или комбинированные протоколы) с ограничением максимальной или управлением графиком нагрузки потребляемой мощности, емкости аккумуляторных батарей, их номинальной мощности и др. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности применения предложенного подхода для оценки изменения показателей графиков нагрузки трансформаторных подстанций на этапе проектирования и в эксплуатации, а также влияния работы зарядных станций на качество электроэнергии и другие энергетические показатели энергетического комплекса.

Перспектива дальнейших исследований связана с построением имитационной модели, позволяющей исследовать процессы управления спросом на электроэнергию со стороны зарядных станций, в том числе с учетом режимов работы парка электромобилей, определяющих расход электроэнергии и конечную степень заряженности аккумуляторных батарей, их деградации, выполнить оценку качества электроэнергии на шинах трансформаторных подстанций при работе зарядных станций, разработать алгоритмы для систем автоматического регулирования мощности зарядных станций.

### Список литературы

1. Sufyan, M., Rahim, N. A., Muhammad, M. A., Tan, C. K., Raihan, S. R. S., & Bakar, A. H. A. (2020). Charge coordination and battery lifecycle analysis of electric vehicles with V2G implementation. *Electric Power Systems Research*, 184, 106307, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106307>.
2. Баканова, Е. И. Основные аспекты влияния собственного парка электромобилей на энергетический комплекс ОАО «РЖД» / Е. И. Баканова, В. Л. Незевак, О. А. Сидоров. – Текст : непосредственный // Проблемы безопасности и эффективности технических систем : сборник докладов конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 15 мая 2024 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – 2024. – С. 87–91. – EDN AZQWYI.
3. Плетнёв, С. Экологичная техника требует заряда. Гудок. – Выпуск: № 102 (27924). – Текст : электронный. – URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1674415> (дата обращения: 15.05.2025).
4. Saraswathi, V. N., & Ramachandran, V. P. (2024). A comprehensive review on charger technologies, types, and charging stations models for electric vehicles. *Heliyon*, 10(20), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38945>.
5. Булатов, Ю. Н. Применение энергоузелов для подключения зарядных станций электромобилей / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, В. В. Кижин. – Текст : непосредственный //

Системы. Методы. Технологии. – 2025. – № 1 (65). – С. 101–107. – DOI 10.18324/2077-5415-2025-1-101-107. – EDN SFCDOК.

6. Мятёж, Т. В. Влияние инверторного режима зарядных станций электромобилей на качество электроснабжения потребителя в энергосистеме / Т. В. Мятёж, В. Я. Любченко, Е. А. Могиленко. – Текст : непосредственный // Энергетические системы. – 2023. – № 1. – С. 83–97. – DOI 10.34031/ES.2023.1.007. – EDN SLLTХС.

7. Кантюков, Н. Р. Оценка эффективности преобразовательных схем для зарядных станций электротранспорта / Н. Р. Кантюков, Р. В. Кириллов, Р. Т. Хазиева. – Текст : непосредственный // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2025. – Т. 21. – № 1. – С. 61–76. – DOI 10.17122/1999-5458-2025-21-1-61-76. – EDN AMSNRK.

8. Воронин, В. А. Управление напряжением в низковольтных распределительных сетях в условиях внедрения домашних зарядных станций электромобилей / В. А. Воронин, Ф. С. Непша. – Текст : непосредственный // iPolytech Journal. – 2024. – Т. 28. – № 2. – С. 261–271. – DOI 10.21285/1814-3520-2024-2-261-271. – EDN ZWSVER.

9. Mouodo, L. V. A., Patrice, N. N. T., Axaopoulos, P., Theodoridis, M. P., Mayi, O. T. S., & Tamba, J. G. (2025). Contribution to optimizing the performance of chargers for electric vehicle batteries: Case of AC-DC converters. *Journal of Energy Storage*, 132, 117603, <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117603>.

10. Kenari, M. T., & Ozdemir, A. (2024). Simultaneous impacts of correlated photovoltaic systems and fast electric vehicle charging stations on the operation of active distribution grids. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 40, 101583, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101583>.

## References

1. Sufyan, M., Rahim, N. A., Muhammad, M. A., Tan, C. K., Raihan, S. R. S., & Bakar, A. H. A. (2020). Charge coordination and battery lifecycle analysis of electric vehicles with V2G implementation. *Electric Power Systems Research*, 184, 106307, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106307>.

2. Bakanova E.I., Nezevak V.L., Sidorov O.A. [The main aspects of the impact of its own fleet of electric vehicles on the energy complex of russian railways]. *Problemy bezopasnosti i effektivnosti texnicheskix sistem : sbornik dokladov konferenczii s mezhdunarodnyim uchastiem, sankt-peterburg, 15 maya 2024 goda* [Problems of safety and effectiveness of technical systems : collection of reports of the conference with international participation, St. Petersburg, May 15, 2024]. St. Petersburg, 2024, pp. 87-91. EDN AZQWYI. (In Russian).

3. Pletnyov, S. *Ekologichnaya tekhnika trebuet zaryada* [Pletnev, S. Eco-friendly appliances require a charge]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1674415> (accessed 15.05.2025).

4. Saraswathi, V. N., & Ramachandran, V. P. (2024). A comprehensive review on charger technologies, types, and charging stations models for electric vehicles. *Heliyon*, 10(20), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38945>.

5. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Kizhin V.V. Using energy routers to connect electric vehicle charging stations. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2025, no. 1(65), pp. 101-107. EDN SFCDOК. (In Russian).

6. Myatezh T., Lyubchenko V., Mogilenko E. The influence of the inverter mode of electric vehicle charging stations on the quality of consumer power supply in the power system. *Energeticheskie sistemy – Energy System*, 2023, no. 1, pp. 83-97. <https://doi.org/10.34031/ES.2023.1.007>. EDN SLLTХС. (In Russian).

7. Kantyukov N.R., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Evaluation of the efficiency of conversion circuits for electric vehicle charging stations. *Elektrotekhnicheskie i informacionnyie komplekсы i sistemy – Electrical and data processing facilities and systems*, 2025, vol. 21, no. 1, pp. 61-76. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-61-76>. EDN AMSNRK. (In Russian).

8. Voronin V.A., Nepsha F.S. Voltage control in low-voltage distribution networks in the context of introducing home charging stations for electric vehicles. *iPolytech Journal*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 261-271. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-261-271>. EDN ZWSVER. (In Russian).

9. Mouodo, L. V. A., Patrice, N. N. T., Axaopoulos, P., Theodoridis, M. P., Mayi, O. T. S., & Tamba, J. G. (2025). Contribution to optimizing the performance of chargers for electric vehicle batteries: Case of AC-DC converters. *Journal of Energy Storage*, 132, 117603, <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117603>.

10. Kenari, M. T., & Ozdemir, A. (2024). Simultaneous impacts of correlated photovoltaic systems and fast electric vehicle charging stations on the operation of active distribution grids. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 40, 101583, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101583>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Баканова Елена Игоревна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-28-31.

E-mail: zfomgups-156-1@mail.ru

### Булаев Егор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Студент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-28-31.

E-mail: bulaev.egor123123@mail.ru

### Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: ostu\_ietpss\_articles@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Баканова, Е. И. Оценка показателей графиков нагрузки трансформаторных подстанций при развитии сети зарядных станций электромобилей / Е. И. Баканова, Е. А. Булаев, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 26 – 37.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Bakanova Elena Igorevna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department “Electric Power Supply of Railways”, OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-28-31.

E-mail: zfomgups-156-1@mail.ru

### Bulaev Egor Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Student of the department “Electric Power Supply of Railways”, OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-28-31.

E-mail: bulaev.egor123123@mail.ru

### Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department “Electric Power Supply of Railways”, OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: ostu\_ietpss\_articles@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Bakanova E.I. Bulaev E. A., Nezevak V.L. Evaluation of load schedules of transformer substations in the development of a network of charging stations for electric vehicles. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 26-37. (In Russian).

М. А. Агеев, К. В. Авдеева

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

**Аннотация.** Статья посвящена совершенствованию регрессионных моделей собственного сопротивления элементов заземляющего устройства при пропускании через него синусоидального тока с целью повышения точности данных моделей. Данный род моделей позволяет с достаточно высокой точностью проводить оценку изменений физических величин. Точность описания зависит от числа факторов, учитываемых при построении модели, и степени полинома регрессии. Представленные в статье модели построены на основании эксперимента по измерению собственного сопротивления элементов заземляющего устройства, в котором через цилиндрические проводники четырех диаметров – 10, 16, 22, 28 мм – пропускался синусоидальный ток с частотой 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1000 Гц. Сила пропускаемого тока изменялась от 6 до 40 А с шагом 2 А. Из-за большого числа факторов и сложного характера физических процессов, протекающих внутри проводника, был применен многофакторный регрессионный анализ. Повышение точности представленных в статье регрессионных моделей было достигнуто за счет увеличения степени полинома регрессии. После построения моделей произведена их оценка на адекватность и оценка коэффициентов полученных моделей на статистическую значимость. Оценка адекватности моделей произведена по критерию Фишера. В результате оценки установлен факт, что полученные модели адекватны и точно описывают экспериментальные данные. Научная новизна работы состоит в совершенствовании регрессионной модели. Практическая значимость исследований заключается в том, что повышение точности позволит получать более достоверные сведения о значении собственного сопротивления элементов заземляющих устройств, что в свою очередь упростит дальнейшую автоматизацию процесса проектирования и моделирования заземляющих устройств.

**Ключевые слова:** заземление, заземляющее устройство, регрессионный анализ, модель, точность.

Maksim A. Ageev, Ksenia V. Avdeeva

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## IMPROVING THE ACCURACY OF REGRESSION MODELS FOR DETERMINING THE INTRINSIC RESISTANCE OF ELEMENTS OF GROUNDING DEVICES OF TRACTION SUBSTATIONS

**Abstract.** The article is devoted to the improvement of regression models of the proper resistance of the elements of a grounding device when passing a sinusoidal current through it in order to increase their accuracy. This type of models allows for a fairly high accuracy in assessing changes in physical quantities. The accuracy of the description depends on the number of factors taken into account when constructing the model and the degree of the regression polynomial. The models presented in the article are based on an experiment to measure the proper resistance of the elements of a grounding device, in which a sinusoidal current with the following frequency was passed through cylindrical conductors of four diameters: 10 mm, 16 mm, 22 mm, 28 mm: 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1000 Hz. The strength of the passed current varied from 6 to 40 A with a step of 2 A. Due to the large number of factors and the complex nature of the physical processes occurring inside the conductor, a multifactor regression analysis was used. The accuracy of the regression models presented in the article was increased by increasing the degree of the regression polynomial. After constructing the models, their adequacy was assessed and the coefficients of the obtained models were assessed for statistical significance. The adequacy of the models was assessed using the Fisher criterion. As a result of the assessment, it was established that the obtained models are adequate and accurately describe the experimental data. The practical significance of the research is that increasing the accuracy will allow obtaining more reliable information about the value of the intrinsic resistance of the elements of grounding devices, which in turn will simplify further automation of the design and modeling process of grounding devices.

**Keywords:** grounding, grounding device, regression analysis, model, accuracy.

Система электроснабжения электрифицированных железных дорог осуществляет питание электрической тяги, нетяговых железнодорожных потребителей и потребителей прилегающих районов.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На основании схемы, представленной на рисунке 1, система электроснабжения электрифицированных железных дорог состоит из двух частей: внешней и тяговой частей [1].

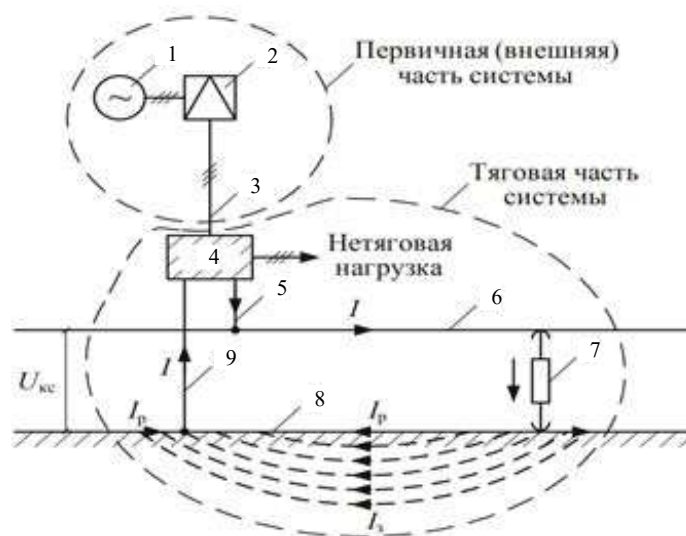


Рисунок 1 – Принципиальная схема системы электроснабжения электрифицированной железной дороги: 1 – электростанция; 2 – повышающая трансформаторная подстанция (для повышения напряжения, получаемого на зажимах генератора, до напряжения линии электропередачи); 3 – линия электропередачи; 4 – тяговая подстанция; 5 – питающая линия тяговой подстанции; 6 – контактная сеть; 7 – электроподвижной состав; 8 – рельсы; 9 – отсасывающая линия (линия обратного тока) тяговой подстанции

Устройство каждой конкретной тяговой подстанции варьируется в зависимости от системы электрической тяги, рода тока и напряжения в контактной сети, а также от системы тока и напряжения источника энергии в первичной части сети [2]. Однако один элемент тяговой подстанции присутствует независимо от описанных выше факторов – заземляющее устройство.

Заземляющее устройство – это конструкция, представляющая собой совокупность горизонтальных и вертикальных заземлителей и соединительных проводников, обеспечивающих электрическое соединение с электроустановкой или частью нетоковедущих конструкций, которые согласно ГОСТ Р 58321–2018 и инструкции ЦЭ-191 должны быть заземлены в случае возникновения внештатных ситуаций. Заземлитель – это металлический электрод, который находится в непосредственном контакте с землей, чем обеспечивает соединение частей электроустановок или нетоковедущих конструкций с землей с определенным сопротивлением. Конструкция заземляющего устройства зависит от большого числа параметров, таких как удельное сопротивление грунта, количество слоев в грунте, его химический состав, сезонные изменения (промерзание, высыхание, увлажнение), тип тяговой подстанции (переменного или постоянного тока), от типа, количества и расстановки оборудования на тяговой подстанции и т. д. [3].

Заземляющие устройства системы тягового электроснабжения железных дорог имеют особенности: заземляющее устройство используется не только для защиты персонала и оборудования, но и для возврата стекающего из рельсовой цепи тока. При этом тяговый ток имеет сложный гармонический состав за счет применения многопульсовых выпрямителей на постоянном токе [3] и тиристорного управления тяговыми двигателями на переменном токе. На гармонический состав тока может влиять также сама контактная сеть, в которой могут возникать резонансы, неравномерные нагрузки на тяговую сеть, зависящие от режима работы тяговых двигателей (пуск, рекуперация, торможение и переходные режимы). Таким образом, через заземлитель протекают как постоянные, так и переменные токи различной величины в широком диапазоне рабочих частот.



В качестве направления исследований выбрано «Разработка методов компьютерного моделирования и автоматизации конструирования и проектирования подвижного состава и устройств электроснабжения» из паспорта научной специальности 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация». В качестве объекта исследования выбрано заземляющее устройство тяговой подстанции. Общая цель работы: создать программное обеспечение для автоматизации проектирования и моделирования заземляющих устройств тяговых подстанций с учетом токов нормального и аварийного режимов. Для достижения этой цели необходимо решить несколько задач: разработать модель собственного сопротивления элемента заземляющего устройства, рассчитать распределение токов и потенциалов в элементах заземляющего устройства в нормальном и аварийном режимах.

В статье решается первая задача – разработать собственную модель с повышенной точностью определения собственного сопротивления элементов заземляющих устройств и применения полученных в ходе моделирования значений при проектировке или при подборе материалов для реконструкции и восстановления уже находящихся в эксплуатации заземляющих устройств на объектах энергетической инфраструктуры ОАО «РЖД».

Выбранная цель исследований соответствует пункту 1.2 документа «Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года», где одной из приоритетных задач устанавливается оснащение энергосетевого комплекса эффективными техническими средствами и автоматизированными системами.

Научные исследования в области заземляющих устройств позволяют усовершенствовать их проектирование и расчет за счет учета различных факторов [4 – 8]. В процессе развития науки был установлен факт изменения сопротивления элементов заземляющих устройств в зависимости от частоты пропускаемого тока [9]. Для получения точных зависимостей изменения сопротивления от частоты пропускаемого через заземлитель тока не рационально производить множественные измерения с малым шагом прогрессии частоты, но необходимость в точном определении такого рода зависимостей существует и в настоящее время. Данная необходимость обусловлена тем, что инженерные способы расчета не дают необходимой точности и не могут полностью описать все возможные варианты работы заземляющих устройств. Эта особенность не позволяет решить приоритетную задачу обеспечения полного и надежного энергетического обеспечения технологий перевозочного процесса, поставленной в пункте 1.2 документа «Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года». Для решения данной проблемы будет использоваться метод регрессионного моделирования, позволяющий построить математическую модель, которая с высокой точностью сможет описать изменение сопротивления заземляющих устройств в целом и элементов заземляющих устройств в частности.

В каждом проводнике в составе заземляющего устройства протекает множество сложных процессов, которые невозможно описать простыми линейными зависимостями, но эту задачу можно решить, используя нелинейные зависимости нескольких факторов. Поэтому было принято решение применить многофакторный регрессионный анализ. Его основной задачей является построение уравнения плоскости в  $(n+1)$ -мерном пространстве, в котором отклонения результатов  $x_i$  были бы минимальными [10]:

$$\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}_i)^2 = \sum_{i=1}^m \left[ x_i - (\beta_0 + \beta_1 y_{i1} + \beta_2 y_{i2} + \dots + \beta_n y_{in}) \right]^2, \quad (1)$$

где  $n$  – количество факторов;

$m$  – количество наблюдений (экспериментов);

$x_i$  – результаты наблюдений;

$\bar{x}_i$  – значения уравнения для соответствующих сочетаний факторов;

$y_{in}$  – значение фактора регрессионного уравнения;

$\beta_i$  – значение коэффициента регрессионного уравнения.

Отыскание минимума выражения (1) состоит в том, чтобы найти частные производные по всем неизвестным  $\beta_0, \dots, \beta_n$  и приравнять их к нулю, получая таким образом систему уравнений. Решение полученной системы уравнений производится матричным методом. Полученные результаты являются коэффициентами регрессионного уравнения  $\beta_i$ , при  $i = \overline{1, n}$ .

Повышения точности регрессионных моделей можно достичь за счет увеличения степени полинома либо объема выборки экспериментальных данных. Поскольку увеличение выборки экспериментальных данных связано со значительными трудозатратами, было принято решение повышать точность моделей за счет увеличения степени полинома.

Первым этапом многофакторного регрессионного анализа является нахождение квадратичной формы. Для этого определяют коэффициенты регрессии  $\beta_0, \beta_j, \beta_{jm}, \dots, \beta_{jj}$  в полиноме:

$$\bar{x} = \beta_0 + \beta_1 y_1 + \dots + \beta_n y_n + \beta_{11} y_1^2 + \dots + \beta_{nn} y_n^2 + \beta_{12} y_1 y_2 + \beta_{13} y_1 y_3 + \dots \quad (2)$$

Степень уравнения можно повышать до тех пор, пока уменьшается остаточная дисперсия. Далее, начиная со второго шага, каждому повышению степени полинома предшествует замена переменных, линеаризующая функции  $y_{n+1} = y_1^2, y_{n+2} = y_2^2, y_{n+3} = y_3^2$  и т. д., после чего коэффициенты нового «расширенного» линейного полинома определяют по формуле (1).

Для оценки адекватности полученного уравнения регрессии будет использоваться критерий Фишера  $F$ . Число степеней свободы в числителе определяется по формуле:

$$\nu_{\text{ч}} = n - 1; \quad (3)$$

число степеней свободы в знаменателе:

$$\nu_{\text{з}} = m - n - 1. \quad (4)$$

Критерий Фишера представляет собой отношение дисперсий:

$$F = \max(S_{\text{адек}}^2, S_{\text{восп}}^2) / \min(S_{\text{адек}}^2, S_{\text{восп}}^2), \quad (5)$$

где  $S_{\text{адек}}^2, S_{\text{восп}}^2$  – дисперсии адекватности и воспроизводимости, определяемые по формулам:

$$S_{\text{адек}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_{\text{экс}i} - Z_{\text{расч}i})^2}{N - n}; \quad (6)$$

$$S_{\text{восп}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (Z_i - \bar{Z})^2}{m - 1}, \quad (7)$$

где  $Z_{\text{экс}}$  – значения, полученные экспериментально;

$Z_{\text{расч}}$  – значения, рассчитанные по эмпирической формуле;

$N$  – общее количество опытов;

$Z$  – значения, полученные экспериментально в параллельных опытах;

$\bar{Z}$  – среднее значение для  $Z$  в  $m$  параллельных опытах.

Уравнение адекватно, если составленное таким образом  $F$ -отношение меньше табличного для выбранного уровня значимости и чисел степеней свободы дисперсии адекватности и дисперсии воспроизводимости

Немаловажным фактором, которым нельзя пренебрегать при построении моделей множественной регрессии, является отсутствие интеркорреляции и функциональной связи.

Если в модели использованы факторы, имеющие высокую интеркорреляцию, или эти факторы функционально связаны, то невозможно будет изолированно определить их влияние на конкретное значение результирующей функции, вследствие чего параметры полученного регрессионного уравнения будут неинтерпретируемы. Для оценки такого рода зависимостей можно использовать коэффициенты парной корреляции, но они в свою очередь оценивают лишь наиболее явную коллинеарность факторов регрессионной модели между собой. В случае многофакторного анализа целесообразнее оценивать мультиколлинеарность факторов между собой.

Мультиколлинеарность представляет собой линейную зависимость более чем двух факторов между собой. Наличие мультиколлинеарности будет означать, что некоторые факторы будут всегда согласованно воздействовать на результирующее значение регрессионного уравнения, что приводит к выводу о том, что выборка исходных данных не независима и нельзя достоверно оценить воздействие каждого фактора в отдельности. Если к оценке данного параметра применять метод наименьших квадратов, то будет справедливо равенство [10]:

$$S_y = S_{\text{факт}} + S_{\varepsilon}, \quad (8)$$

где  $S_y$  – общая сумма квадратов отклонений;

$S_{\text{факт}}$  – факторная сумма квадратов отклонений;

$S_{\varepsilon}$  – остаточная сумма квадратов отклонений.

Если факторы независимы друг от друга, то должно выполняться равенство:

$$S_{\text{факт}} = S_r + S_f + S_l, \quad (9)$$

где  $S_r$ ,  $S_f$ ,  $S_l$  – суммы квадратов отклонений, обусловленные влиянием соответствующих факторов.

В процессе изучения публикаций в данной области рассмотрены модели [11, 12], представляющие собой множественный (многофакторный) регрессионный анализ изменения активного и реактивного сопротивления заземляющего устройства при пропускании через него синусоидального тока от трех параметров (независимых переменных): диаметра цилиндрического проводника, частоты и силы тока, протекающего через проводник.

Исследуемая модель представляет собой полином регрессии четвертой степени для описания собственного сопротивления цилиндрического проводника от четырех диаметров: 10, 16, 22, 28 мм, силы тока от 6 до 40 А с шагом 2 А и семи частот: 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1000 Гц. Следует заметить, что для оценки точности модели используется дисперсия адекватности, которая равна  $0,182 \cdot 10^{-6}$  для активной составляющей сопротивления при пропускании через проводник синусоидального тока и  $0,068 \cdot 10^{-6}$  для реактивной составляющей, дисперсия воспроизводимости во всех опытах равна  $2,53 \cdot 10^{-8}$ . В дальнейшем полученная модель будет оцениваться по этому же параметру. Так как принято решение о снижении дисперсии за счет увеличения степени полинома, кратно увеличилась сложность производимых расчетов. В связи с этим было принято решение для проведения расчетов использовать пакет MathCad. Для построения собственной модели от автора исследуемой модели были получены экспериментальные данные, на основе которых была построена исследуемая модель. Описание эксперимента, в ходе которого были получены данные, представлено в работе [13]. Применение при моделировании максимального диаметра проводника 28 мм обусловлено двумя факторами.

1. На объектах ОАО «РЖД», таких как ЭЧЭ-138 Московка, ЭЧЭ-142 Осокино, ЭЧЭ-202 Кисляковка и им подобных, в качестве вертикальных заземлителей применяется металлический уголок  $63 \times 63 \times 6$  мм, эквивалентный диаметр которого составляет 30 мм. На объектах ОАО «РЖД» могут применяться также уголки с большим эквивалентным диаметром.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Гистограмма, наглядно представляющая распределение эквивалентных диаметров вертикальных элементов заземляющих устройств, применяемых на тяговых подстанциях в пределах Западно-Сибирской железной дороги, представлена на рисунке 2.

2. В рамках эксперимента, в результате которого были получены данные для построения модели, были использованы имевшиеся на тот момент времени цилиндрические проводники стандартизированных диаметров. Это позволило обеспечить максимально возможное на момент эксперимента расширение рабочего диапазона модели и значительно увеличить возможности ее практического применения.

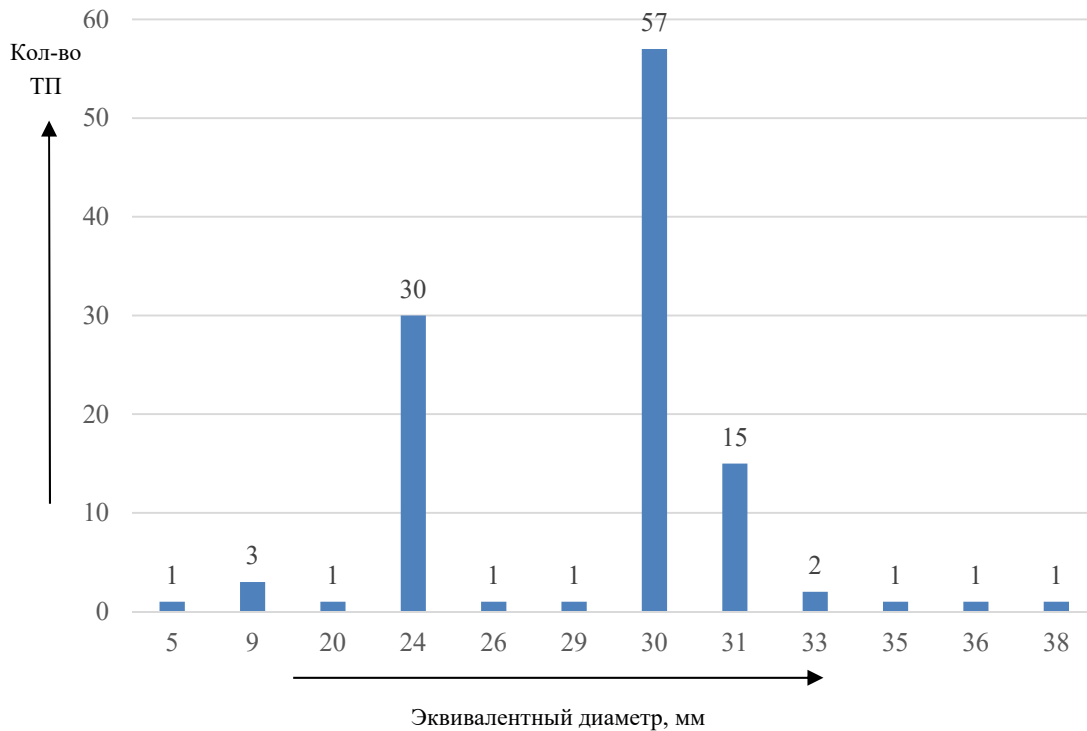


Рисунок 2 – Гистограмма эквивалентных диаметров вертикальных элементов заземляющих устройств, применяемых на тяговых подстанциях в пределах Западно-Сибирской железной дороги

Полиномы регрессии для активной и реактивной составляющих собственного сопротивления цилиндрического проводника имеют вид:

$$R_{\text{ц}re} = \sum_{i=1}^m \beta_{\text{ци}i} r^{M_{i,1}} f^{M_{i,2}} I^{M_{i,3}}; \quad (10)$$

$$R_{\text{ц}im} = \sum_{i=1}^m \gamma_{\text{ци}i} r^{M_{i,1}} f^{M_{i,2}} I^{M_{i,3}}. \quad (11)$$

где  $\beta_{\text{ци}}$ ,  $\gamma_{\text{ци}}$  – коэффициенты регрессионного уравнения;

$r$  – радиус цилиндрического проводника, мм;

$f$  – частота протекающего по проводнику тока, Гц;

$I$  – значение тока, А;

$M$  – матрица, элементами которой являются значения степеней, в которые возводятся факторы.

В результате увеличения степени полинома до восьмой построенная модель для активного сопротивления проводника при пропускании синусоидального тока имеет показатель дисперсии  $0,052 \cdot 10^{-6}$ , что в 3,5 раза меньше, чем у существующей модели.

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На рисунках 3 и 4 представлены графики сравнения существующей модели с моделью, полученной в результате увеличения степени полинома регрессионного уравнения. Сплошной линией на указанных рисунках показано распределение значений регрессионного уравнения в зависимости от изменения тока при диаметре цилиндрического проводника 22 мм и частоте пропускаемого синусоидального тока 100 Гц, пунктирной линией – значения экспериментальных данных для описанных выше параметров.

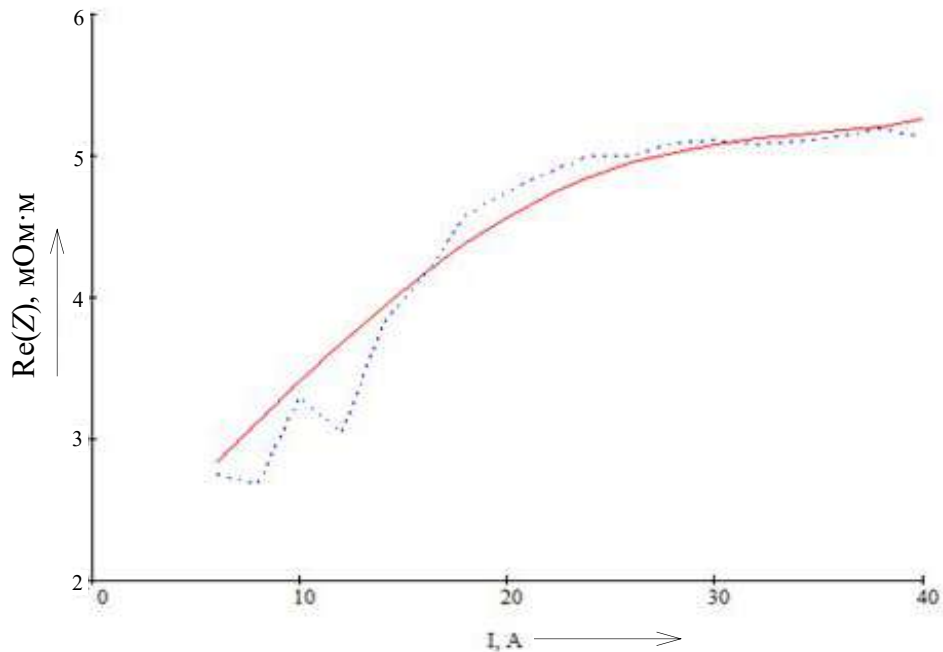


Рисунок 3 – Результат расчета с помощью исходной модели четвертой степени для активной составляющей сопротивления

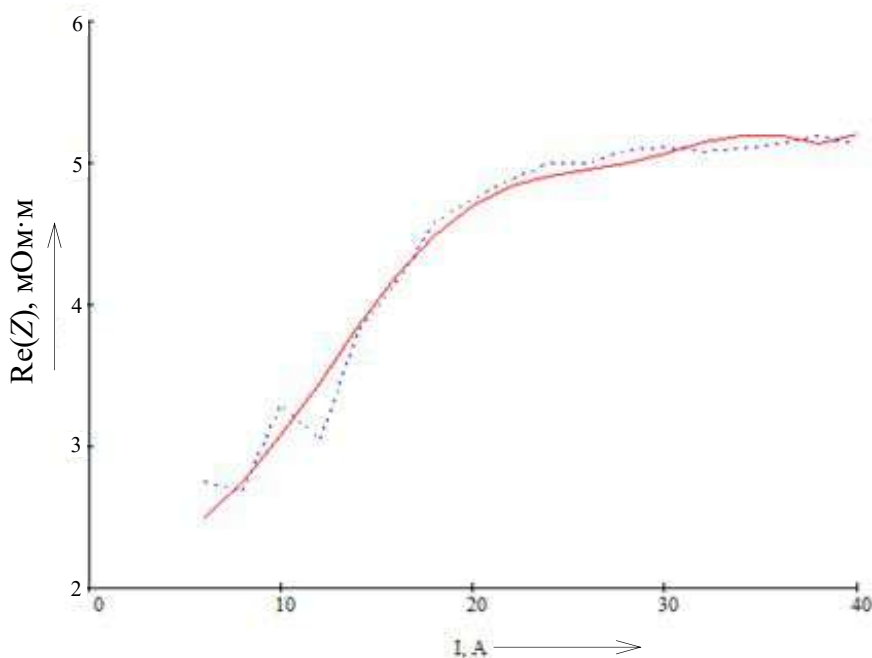


Рисунок 4 – Результат расчета с помощью полученной модели восьмой степени для активной составляющей сопротивления

В результате увеличения степени полинома до восьмой построенная модель для реактивной составляющей сопротивления имеет показатель дисперсии  $0,025 \cdot 10^{-6}$ , что в 2,7 раза меньше, чем у существующей модели.

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На рисунках 5 и 6 представлены графики сравнения существующей модели с моделью, полученной в результате увеличения степени полинома регрессионного уравнения. Сплошной линией показано распределение значений регрессионного уравнения в зависимости от изменения тока при диаметре цилиндрического проводника 10 мм и частоте пропускаемого синусоидального тока 50 Гц, пунктирной линией – экспериментальные данные для описанных выше параметров.

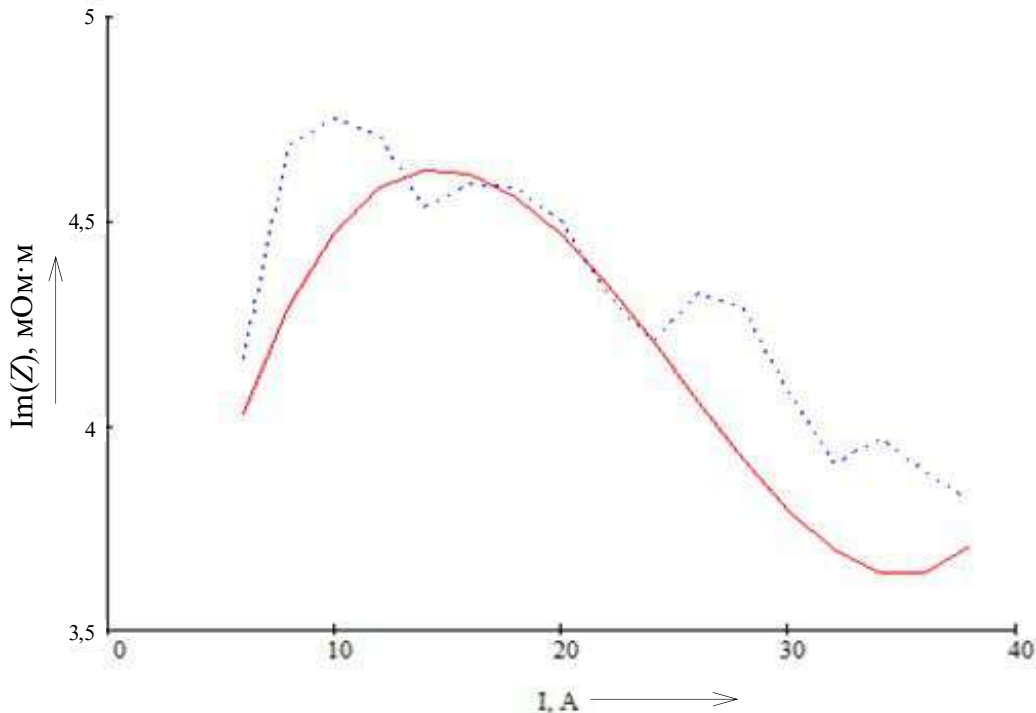


Рисунок 5 – Результат расчета с помощью исходной модели четвертой степени для реактивной составляющей сопротивления

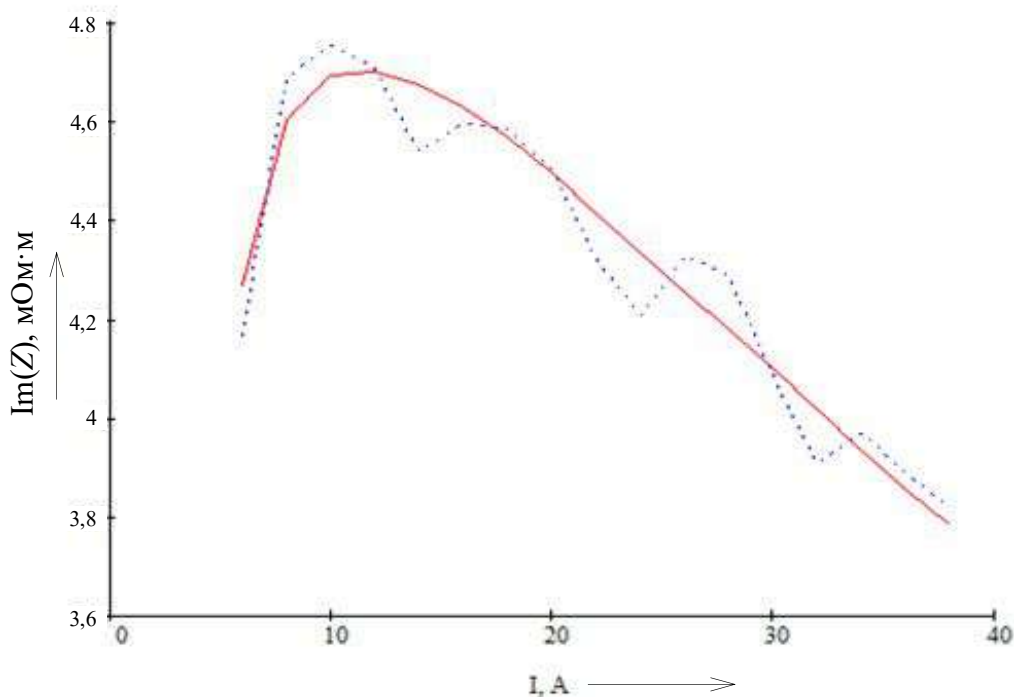


Рисунок 6 – Результат расчета с помощью полученной модели восьмой степени для реактивной составляющей сопротивления

Значение критерия Фишера для модели активной составляющей собственного сопротивления равно 2,077, а для реактивной составляющей 0,979. При 5 %-ном уровне значимости, числе степеней свободы для числителя 443 и знаменателя 2 табличное значение критерия Фишера равно 19,496 [10]. Поскольку  $F < F_{\text{табл}}$  полученные модели адекватно описывают экспериментальные данные. После оценки на мультиколлинеарность установлено, что факторы независимы друг от друга, обе модели интерпретируемы.

По результатам проведенной работы получены регрессионные модели для цилиндрических проводников диаметром от 10 до 28 мм, которые имеют большую точность, чем существующие. Для модели активной составляющей собственного сопротивления цилиндрического проводника точность увеличилась в 3,5 раза, а для реактивной – в 2,7 раза. Полученные модели в дальнейшем могут быть использованы для создания программных средств, позволяющих автоматизировать проектирование и моделирование заземляющих устройств тяговых подстанций.

### Список литературы

1. Тер-Оганов, Э. В. Электроснабжение железных дорог / Э. В. Тер-Оганов, А. А. Пышкин. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2014. – 432 с. – Текст : непосредственный.
2. ГОСТ Р 58321–2018. Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 45 с. – Текст : непосредственный.
3. Кучеренко, Д. Е. Влияние особенностей грунта на расчёт и проектирование ЗУ / Д. Е. Кучеренко, Д. Н. Грищенко. – Текст : непосредственный // *Colloquium-Journal*. – 2018. – № 12-6(23). – С. 84–90. – EDN PJLFB.
4. Оптимизация конструкций заземляющих устройств тяговых подстанций по минимальной стоимости материалов и монтажа при обеспечении условий электробезопасности / Ю. В. Демин, Б. В. Палагушкин, Г. В. Иванов [и др.]. – Текст : непосредственный // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2017. – № 1-2. – С. 33–36. – EDN ZEKGD.
5. Гавриленко, Е. Н. Анализ влияния эксплуатационных факторов на надежность заземляющих устройств тяговых подстанций железнодорожного транспорта / Е. Н. Гавриленко. – Текст : непосредственный // *Наука Промышленность Оборона : труды XIX всерос. науч.-техн. конф.: в 4 томах, Новосибирск, 18–20 апреля 2018 г.* / Под ред. С. Д. Саленко. Том III / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2018. – С. 59–60. – EDN OUNPFH.
6. Абдуллозода, Р. Т. Расчет коррозионного состояния элементов заземлителей / Р. Т. Абдуллозода, О. С. Сайфиддинзода, Х. Д. Бобоев. – Текст : непосредственный // *Технологическая независимость и конкурентоспособность Союзного Государства, стран СНГ, ЕАЭС и ШОС : сборник статей VI междунар. науч.-техн. конф.: в 3 томах, Минск, 06–08 декабря 2023 г.* / Белорусский государственный технологический университет– Минск, 2023. – Т. 3. – С. 292–296. – EDN YOVAWE.
7. Akef, S., El-Morshedy, A. M., Samy, M. M., Emam, A. M., & El-Hawary, H. H. (2024). Ground resistance estimation for a DC converter station: Theory versus experiment. *Energies*, 17(4), 765, <https://doi.org/10.3390/en17040765>.
8. Dou, B., Liu, R., Tu, Y., & Zhang, B. (2022). A method for calculating grounding resistance of reinforced concrete foundation grounding systems. *Energies*, 15(13), 4607, <https://doi.org/10.3390/en15134607>.
9. Бургсдорф, В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Яковс. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 400 с. – Текст : непосредственный.
10. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – Москва : Высшая школа. 1988. – 239 с. – Текст : непосредственный.

11. Демидова, О. А. Эконометрика / О. А. Демидова, Д. И. Малахов. – Москва : Юрайт, 2025. – 398 с. – Текст : непосредственный.
12. Авдеева, К. В. Совершенствование методов и программно-аппаратных средств определения технического состояния заземляющих устройств тяговых подстанций / К. В. Авдеева, В. А. Кандаев. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – 168 с. – Текст : непосредственный. – EDN ULFZYT.
13. Авдеева, К. В. Применение регрессионного анализа к исследованию собственного сопротивления элементов заземляющего устройства / К. В. Авдеева. – Текст : непосредственный // Межвузовский сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов / Министерство образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ). – Выпуск 4. – Часть 1. – Омск, 2007. – С. 8–13. – EDN XNEQTR.

## References

1. Ter-Oganov E.V., Pyshkin A.A., *Elektrosnabzhenie zheleznih dorog* [Electricity supply for railways]. Yekaterinburg, Ural State Transport University Publ., 2014, 432 p. (In Russian).
2. National Standard 58321–2018. Grounding devices. Potential equalization systems. Grounding electrodes. Grounding conductors. Moscow, Standardinform Publ., 2020. 45 p. (In Russian).
3. Kucherenko D.E., Grischenko D.N. The influence of soil features on the calculation and design of GD. *Colloquium-Journal*, 2018, no. 12-6(23), pp. 84-90. EDN PJILFB. (In Russian).
4. Demin Yu.V., Palagushkin B.V., Ivanov G.V., Kuznetsov A.Yu., Plotnikov D.N., Solntseva E.N., Romanov M.N. Design optimization of grounding devices of traction substations, at a minimum cost of materials and installation while maintaining the electrical conditions. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2017, no. 1-2, pp. 33-36. EDN ZEKGD. (In Russian).
5. Gavrilenko E.N. [Analysis of the influence of operational factors on the reliability of grounding devices of traction substations of railway transport]. *Nauka. Promyshlennost'. Oborona : trudy XIX vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Science, industry, defense: Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference]. Novosibirsk, 2018, vol. III, pp. 59-60. EDN OUNPFH. (In Russian).
6. Abdullozoda R.T., Sayfiddinzoda O.S., Boboev Kh.D. [Calculation of corrosion state elements of grounding leaders]. *Tekhnologicheskaya nezavisimost' i konkurentosposobnost' soyuznogo gosudarstva, stran SNG, EAES i SHOS : sbornik statej VI mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Technological independence and competitiveness of the union state, the CIS, EAEU and SCO countries: collection of articles of the VI International scientific and technical conference]. Minsk, 2023, vol. 3, pp. 292-296. EDN YOVAWE. (In Russian).
7. Akef, S., El-Morshedy, A. M., Samy, M. M., Emam, A. M., & El-Hawary, H. H. (2024). Ground resistance estimation for a DC converter station: Theory versus experiment. *Energies*, 17(4), 765, <https://doi.org/10.3390/en17040765>.
8. Dou, B., Liu, R., Tu, Y., & Zhang, B. (2022). A method for calculating grounding resistance of reinforced concrete foundation grounding systems. *Energies*, 15(13), 4607, <https://doi.org/10.3390/en15134607>.
9. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Zazemlyayushchie ustrojstva elektroustanovok* [Grounding devices for electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 400 p. (In Russian).
10. Lvovsky E.N. *Statisticheskie metodi postroeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods for constructing empirical formulas]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 239 p. (In Russian).
11. Demidova O.A., Malahov D.I. *Ekonometrika* [Econometrics]. Moscow, Yurait Publ., 2025, 398 p. (In Russian).



12. Avdeeva K.V., Kandaev V.A. *Sovershenstvovanie metodov i programmno-apparatnykh sredstv opredeleniia tekhnicheskogo sostoianiia zazemliaiushchikh ustroystv tiagovykh podstantsii* [Improving methods and hardware and software for determining the technical condition of grounding devices of traction substations]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2015, 168 p. EDN ULFZYU. (In Russian).

13. Avdeeva K.V. [Application of regression analysis to the study of the self-resistance of elements of a grounding device]. *Mezhvuzovskii sbornik trudov molodikh uchenikh, aspirantov i studentov* [Interuniversity collection of works of young scientists, graduate students and students]. Omsk, 2007, no. 4, part 1, pp. 8-13. EDN XNEQTR. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Агеев Максим Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация,

Аспирант кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: dratyti00@mail.ru

### Авдеева Ксения Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: avdeeva\_kv@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Ageev Maksim Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department "Telecommunication, radiotechnical systems and networks", OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94,

E-mail: dratyti00@mail.ru.

### Avdeeva Ksenia Vasilievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, docent, associate professor of the department "Telecommunication, radiotechnical systems and networks", OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: avdeeva\_kv@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Агеев, М. А. Повышение точности регрессионных моделей для определения собственного сопротивления элементов заземляющих устройств тяговых подстанций / М. А. Агеев, К. В. Авдеева. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 38 – 48.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ageev M.A., Avdeeva K.V. Improving the accuracy of regression models for determining the intrinsic resistance of elements of grounding devices of traction substations. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3(63), pp. 38-48. (In Russian).

УДК 629.4.021

**А. С. Космодамианский, А. Е. Карпов, А. А. Фатеев**

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЯГОВОГО ПРИВОДА ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ СЦЕПНЫХ СВОЙСТВ

**Аннотация.** Рассмотрена проблема снижения тягово-сцепных свойств грузовых электровозов под действием динамической составляющей крутящего момента при прохождении вертикальных неровностей пути, которое может достигать 20 %. В результате проведенного анализа определены варианты конструкций тяговых приводов, позволяющие устранить данное явление. Установлено, что тяговые приводы с опорно-рамным подвешиванием тягового электродвигателя и тяговой передачи ввиду особенностей их конструкции имеет смысл применять при использовании высокомоментных тяговых электродвигателей с осевым магнитным потоком, а тяговые приводы с опорно-рамным тяговым двигателем и осевым редуктором –

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

случаях, когда допустимо внесение изменений в конструкцию рамы тележки. Для модернизации имеющегося парка грузовых электровозов с асинхронными ТЭД предложено применять опорно-осевой привод с упругим звеном, не требующий внесения изменений в конструкцию рамы тележки. Проведен поиск новых вариантов размещения упругих элементов в опорно-осевом приводе. Предложена конструкция опорно-осевого тягового привода агрегатной компоновки, в котором упругий элемент представляет собой одинарную упруго-компенсирующую муфту, варианты конструкции опорно-осевого тягового привода интегрированной компоновки с применением тонкослойных резинометаллических элементов и размещением упругих элементов в полой якоря или на колесных центрах, а также вариант конструкции тягового привода с опорно-рамным подвешиванием тягового электродвигателя и двойной зубчатой муфтой, в котором упругие элементы расположены в диске колесного центра, а осевой редуктор опирается на колесную пару через полый вал и тонкослойные резинометаллические элементы. На предложенные конструкции получен патент на полезную модель и поданы три заявки на получение патента.

**Ключевые слова:** тяговый привод локомотива, сцепление колеса с рельсом, динамика, надежность, конструирование.

**Andrey S. Kosmodamiansky, Artem E. Karpov, Andrey A. Fateev**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

## MODERNIZATION OF TRACTION DRIVES OF FREIGHT ELECTRIC LOCOMOTIVES TO IMPROVE ADHERENCE PROPERTIES

**Abstract.** This article examines the problem of reducing the traction properties of freight electric locomotives under the influence of the dynamic component of torque when passing vertical track irregularities, which can reach 20 %. The analysis identified traction drive designs that can eliminate this phenomenon. It was established that traction drives with a frame-mounted traction motor and traction transmission, due to their design features, make sense when using high-torque traction motors with axial magnetic flux, while traction drives with a frame-mounted traction motor and axial gearbox are suitable in cases where modifications to the bogie frame design are permissible. To modernize the existing fleet of freight electric locomotives with asynchronous traction motors, it is proposed to use a frame-mounted drive with an elastic link, which does not require modifications to the bogie frame design. A search for new options for the placement of elastic elements in the frame-mounted drive is conducted. The proposed design includes a modular axle-support traction drive in which the elastic element is a single elastic-compensating coupling. The design also includes variants of an integrated axle-support traction drive using thin-layer rubber-metal components and placing the elastic elements in a hollow anchor or on the wheel centers. A variant of the traction drive design features a frame-mounted traction motor and a double toothed coupling, in which the elastic elements are located in the wheel center disc, and the axle gearbox is supported on the wheel pair via a hollow shaft and thin-layer rubber-metal components. A utility model patent has been received for the proposed designs, and three patent applications have been filed.

**Keywords:** locomotive traction drive, wheel-rail adhesion, dynamics, reliability, design.

В 60-х – 70-х гг. прошлого столетия было обнаружено, что наличие динамической составляющей крутящего момента в тяговом приводе локомотива при проезде вертикальных неровностей пути способно существенно ухудшать его сцепные свойства. Так, согласно работе [1] было обнаружено, что для тепловоза 2ТЭ10Л, имевшего опорно-осевой привод с жесткой тяговой передачей, на участках с волнообразным износом рельсов коэффициент сцепления снижался на 20 % и более. В источнике [2] указывается, что применение на грузовых тепловозах упругих зубчатых колес (УЗК) привело к снижению интенсивности износа бандажей на 15 %, что свидетельствует о снижении скольжения колеса по рельсу. В. Н. Ивановым и А. И. Беляевым в работе [3] была теоретически и экспериментально доказана связь динамической составляющей крутящего момента с величиной проскальзывания колесной пары, а следовательно, и с предельной силой тяги по условиям сцепления колеса с рельсом. Как показали исследования А. И. Беляева [4, 5], динамическая составляющая крутящего момента в тяговом приводе без упругих связей в валопроводах превышала величину максимального крутящего момента по сцеплению, что послужило достаточным основанием для выводов о необходимости снижения этой составляющей и начале разработки в нашей стране УЗК для грузовых тепловозов и электровозов, а также о разработке перспективных грузовых тепловозов и электровозов с опорно-рамным тяговым приводом.

Следует отметить, что исследований влияния конструкции тягового привода на сцепные свойства локомотива в эксплуатации в объеме, достаточном для прогнозирования коэффициента сцепления, не проводилось ни в нашей стране, ни за рубежом. При этом в работе [6] утверждалось, что в случае применения опорно-рамного привода для грузового электровоза ожидается повышение реализуемого коэффициента тяги на 12 – 15 %. Разумеется, необходимо учитывать, что на величину сцепления колеса с рельсом влияет большое число различных факторов, в том числе и конструктивные решения узлов экипажной части, не относящиеся к механической части тягового привода, что ранее было рассмотрено авторами в источниках [7, 8], а также существенную зависимость динамической составляющей крутящего момента от конструкции и состояния пути, в связи с чем оценку возможностей повышения коэффициента тяги, приведенную в работе [6], необходимо рассматривать как предварительную.

В начале 21 столетия основным путем повышения тяговых свойств отечественных грузовых электровозов стало повышение осевой нагрузки с 226 до 245 кН и применение асинхронных тяговых электродвигателей (ТЭД) в сочетании с поосным регулированием силы тяги, что позволило увеличить осевую силу тяги в часовом режиме до 70...80 кН исходя из возможности повышения расчетного крутящего момента ТЭД. При этом осевая сила тяги грузовых электровозов с коллекторными ТЭД за счет поосного регулирования выросла до 60 кН, что в сочетании с существенно более низкой ценой электровозов с коллекторными ТЭД препятствует внедрению асинхронных ТЭД на железнодорожном транспорте.

Улучшение сцепных свойств электровозов с асинхронными ТЭД за счет снижения динамической составляющей крутящих моментов, возникающих в тяговом приводе вследствие прохождения вертикальных неровностей пути, путем применения зубчатых колес с упругими элементами к настоящему времени затруднено тем, что ресурс подшипников тягового привода и зубчатых колес в настоящее время превосходит ресурс упругих элементов и посадочных мест под них. В частности, это относится к тяговым приводам интегрированной компоновки, применяемым на грузовых электровозах фирм Siemens и Bombardier, где за счет увеличения частоты вращения ТЭД удалось снизить их массу, а также к приводу электровоза 2ЭС8 с двусторонней тяговой передачей, для которой создание УЗК не было доведено до создания серийных образцов [9].

Исходя из того факта, что грузовые электровозы для отечественных железных дорог строятся большой серией (порядка 300 единиц в год), в вопросе о целесообразности наличия упругого звена в валопроводах тягового привода имеет смысл исходить из необходимости предотвращения случаев максимального проигрыша, т. е. случаев снижения сцепления колеса с рельсом на 20 %, отмеченных в работе [1], и целесообразности модернизации парка электровозов, в первую очередь имеющих асинхронные ТЭД как предназначенных для работы на наиболее грузонапряженных участках дорог. При этом основная проблема заключается в недостаточном количестве принципиально новых конструктивных решений, позволяющих размещать упругие элементы в различных типах тяговых приводов вне зубчатого колеса. Предлагаемая статья является попыткой решения указанной проблемы.

Снижение динамической составляющей крутящего момента в тяговом приводе при проезде неровностей возможно с помощью следующих конструктивных мероприятий:

- применение опорно-рамных тяговых приводов;
- применение опорно-центрального тягового привода;
- применение новых компоновочных схем опорно-осевого привода, позволяющего разместить упругие элементы вне зубчатого колеса;
- модернизация известных конструктивных схем опорно-осевого привода для размещения упругих элементов вне зубчатого колеса;
- модернизация конструктивных схем опорно-рамных приводов для устранения их недостатков.

Конструктивные схемы рассматриваемых тяговых приводов показаны на рисунке 1, названия конструктивных схем даны в соответствии с ранее предложенной классификацией [10].

Для сравнения данных конструктивных мероприятий в качестве показателя используется соотношение динамической составляющей касательного усилия на ободах колес колесной пары, возникающей под действием динамической составляющей крутящего момента и статической составляющей касательного усилия на ободах колес колесной пары (далее – осевой силы тяги) в расчетном режиме электровоза. Основная сложность при этом заключается в том, что тяговые приводы различных конструктивных схем применялись на локомотивах, имевших разную конструкцию экипажной части, что оказывало влияние на внешние возмущения. При этом математическое моделирование динамических моментов в приводах различной конструкции для одного и того же варианта экипажной части локомотива затруднено наличием виброударных процессов в тяговой передаче и изменением величины упругого скольжения колес по рельсам, что особенно сказывается на оценке величины крутящего момента в опорно-осевых приводах при отсутствии упругого звена в валопроводах.

В связи с данным обстоятельством для сравнения были использованы результаты натурных испытаний тяговых приводов разных серий локомотивов на основании двух следующих допущений.

*Первое.* В ходе экспериментальных исследований привода исследователями были выявлены максимально возможные величины динамической составляющей крутящего момента с целью оценки прочности его деталей и узлов.

*Второе.* Для исследуемых локомотивов, доведенных до стадии образцов для опытной эксплуатации, параметры динамической системы тягового привода находятся в зоне консервативности динамических показателей, т. е. применительно к рассматриваемому случаю, максимальная величина динамического крутящего момента в приводе будет мало зависеть от конструкции экипажной части (например, в связи с тем, что частота собственных колебаний системы тягового привода по низшей форме существенно отличается от основных форм колебаний наддрессорного строения) [11].

*Применение опорно-рамных тяговых приводов.* Для опорно-рамных тяговых приводов с полым карданным валом на оси (рисунок 1, а, б) характерны наименьшие величины динамической составляющей крутящего момента при прохождении неровностей пути. Так, на электровозе ВЛ84 [12] максимальная величина динамической составляющей касательного усилия на ободу колеса при скорости 110 км/ч составила 30 кН – это 0,4 от осевой силы тяги электровоза 2ЭС10 в часовом режиме. Однако привод с полым карданным валом на оси требует увеличения централи для размещения полого вала между ТЭД и осью. Кроме того, для привода такого типа необходимо создание передаточных механизмов на тихоходной части передачи, рассчитанных на передачу крутящего момента более 110 кН·м.

В отечественной практике предпринимались попытки создания опорно-рамного тягового привода без полого карданного вала на оси с использованием шарнирно-поводковой муфты, компенсирующей как угол перекоса валов большого зубчатого колеса и оси колесной пары, так и их поперечное смещение (рисунок 1, в). В частности, такой привод был применен на опытном электровозе ВЛ81; в дальнейшем во ВНИКТИ был испытан уравновешенный шарнирно-поводковый механизм, который может быть использован в подобных приводах [9]. Несмотря на выявленные в ходе испытаний конструктивные недостатки, нельзя не отметить возможность повысить нагрузочную способность данной конструкции привода, например, за счет использования ранее предложенных авторами настоящей статьи двухслойных сферических резинометаллических шарниров [13].

Наконец, еще одним недостатком привода с подвешиванием тяговой передачи на раме тележки является необходимость уменьшать диаметр большого зубчатого колеса вследствие того, что корпус редуктора относится к подрессоренным массам, и расстояние по вертикали от его нижней части до уровня головок рельсов должно быть больше с учетом колебаний наддрессорного строения и просадки рессор. Это ведет к ограничению передаточного числа редуктора, максимальной частоты вращения ротора ТЭД и увеличения веса ТЭД. С учетом перечисленных недостатков рассматривать приводы с полностью подрессоренными ТЭД и

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

тяговой передачей в качестве пути улучшения сцепных свойств целесообразно в случае использования высокомоментных ТЭД с аксиальным магнитным потоком, имеющих меньшую частоту вращения, чем аналогичные ТЭД с радиальным магнитным потоком.

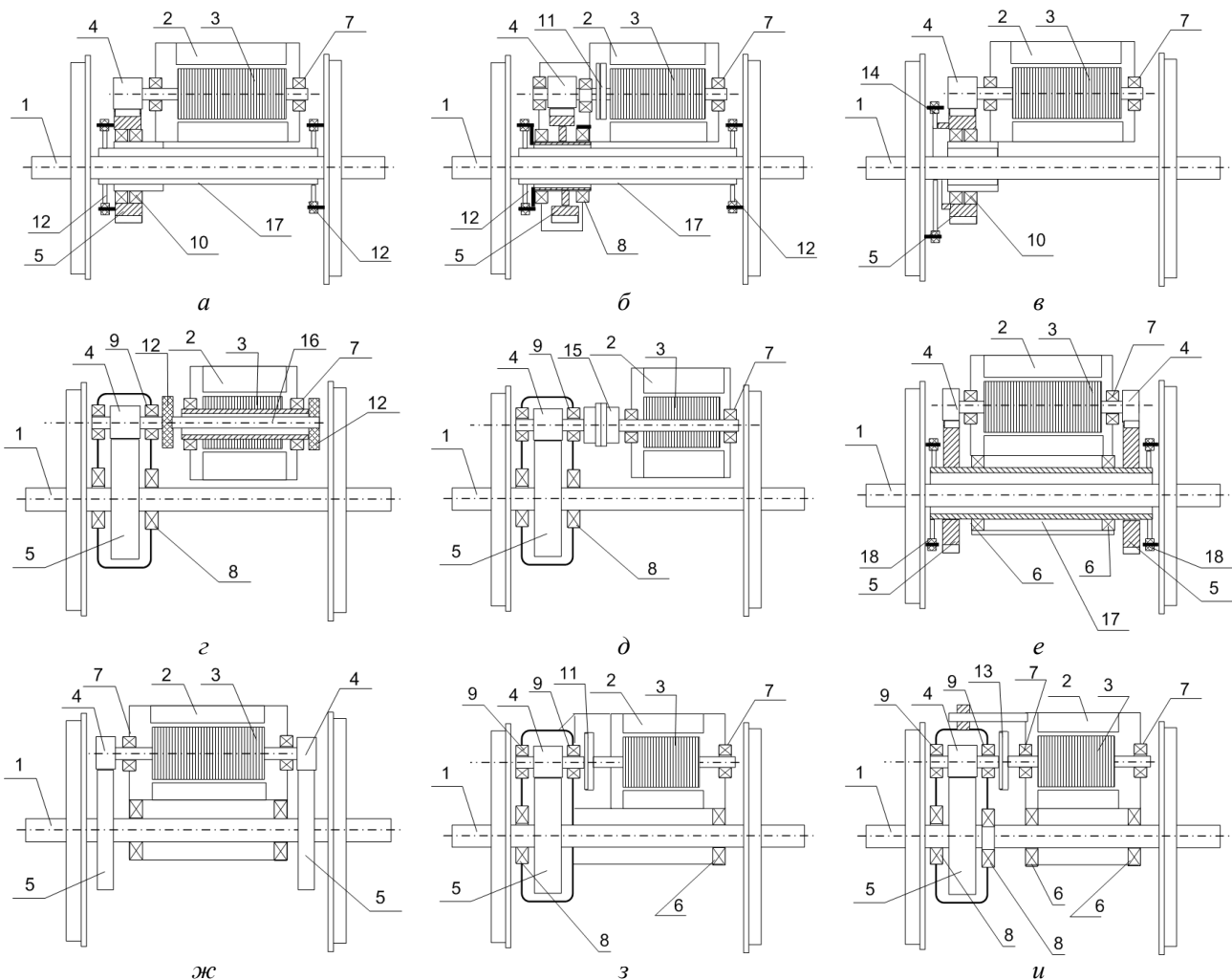


Рисунок 1 – Конструктивные схемы рассматриваемых тяговых приводов электровозов: *а* – опорно-рамный привод с полым карданным валом, простая компоновка; *б* – опорно-рамный привод с полым карданным валом, интегрированная компоновка; *в* – опорно-рамный привод с двойной муфтой; *г* – опорно-рамный привод с осевым редуктором и торсионным валом в полом якоре; *д* – опорно-рамный привод с осевым редуктором и двойной зубчатой муфтой; *е* – опорно-центральный привод; *ж* – опорно-осевой привод, простая компоновка; *з* – опорно-осевой привод, интегрированная компоновка; *и* – опорно-осевой привод, агрегатная компоновка; 1 – колесная пара; 2 – статор ТЭД; 3 – ротор ТЭД; 4 – малое зубчатое колесо; 5 – большое зубчатое колесо; 6 – моторно-осевой подшипник; 7 – подшипник ротора ТЭД; 8 – осевой подшипник редуктора; 9 – подшипник оси малого зубчатого колеса; 10 – подшипник большого зубчатого колеса; 11 – дисковая (мембранная) муфта; 12 – компенсирующая муфта; 13 – упругокомпенсирующая муфта; 14 – двойная компенсирующая муфта; 15 – двойная зубчатая муфта; 16 – торсионный вал; 17 – полый вал; 18 – амортизаторы

Перечисленные проблемы изначально сняты в тяговых приводах с опорно-рамным ТЭД и осевым редуктором (рисунок 1 *г*, *д*), поскольку передаточный механизм расположен на быстроходной части привода. Согласно результатам испытаний такого привода на грузовом тепловозе 2ТЭ121, имевшем диаметр колес 1250 мм, как на электровозах, при скорости движения 50 км/ч, соответствующей расчетной скорости движения, при движении по участку Голутвин – Рязск Московской железной дороги, где эксплуатируются электровозы, максимальная величина динамической составляющей усилия, приведенного к ободу колеса, достигала 35...40 кН, т. е. 0,5...0,55 от осевой силы тяги электровоза 2ЭС10 в часовом режиме,

что ненамного выше, чем для привода с полым карданным валом на оси. Привод такого типа технологически прост и применяется, в частности, на пассажирских электровозах ЭП1.

К недостаткам данного привода, как и всех приводов с опорно-рамным подвешиванием ТЭД, относится то, что при модернизации эксплуатируемых локомотивов потребуются внесение изменений в конструкцию рамы тележки для крепления ТЭД. Кроме того, для привода с торсионным валом в полом роторе необходимо увеличивать диаметр якорных подшипников, что ведет к снижению максимальной частоты вращения ротора и увеличению массы ТЭД. Для устранения этого недостатка фирмой Siemens на тепловозе ER20CF применен вариант привода с двойной зубчатой муфтой (рисунок 1, *д*, [14]). Однако при этом податливость привода должна обеспечиваться за счет упругости подвески осевого редуктора, что увеличивает несоосность валов ротора ТЭД и ведущей шестерни осевого редуктора и снижает долговечность зубчатой муфты.

*Опорно-осевой привод с упругим опиранием ТЭД на колесную пару*, иначе – опорно-центральной привод (рисунок 1, *е*), технически позволяет модернизировать колесно-моторный блок без внесения изменений в конструкцию тележки. Однако, как показали исследования ВНИКТИ [15], повышение соотношения «крутящий момент – вес ТЭД» влечет за собой проблемы для создания упругих элементов, которые обеспечивали достаточную амортизирующую способность и надежность. Кроме того, радиальная деформация упругих опор ТЭД на колесную пару под действием сил реакции при создании тягового усилия требует увеличения зазора между осью колесной пары и полым валом, на который опирается ТЭД, что в свою очередь требует увеличения централи зубчатой передачи. В настоящее время такая схема привода используется на электропоездах ЭШ2 KISS (АЭРО) производства швейцарской компании Stadler и ЭГ2Тв выпуска ОАО «ТВЗ», ее недостатки были рассмотрены ранее в источнике [16].

*Модернизация известных конструктивных схем опорно-осевого привода.* Из применяемых на отечественных железных дорогах конструкций опорно-осевых приводов электровозов с жестким опиранием ТЭД на колесную пару (рисунок 1, *ж, з, и*) будем рассматривать те из них, которые позволяют реализовать преимущество асинхронного ТЭД в виде возможности повысить максимальное число его оборотов и тем самым снизить общую массу экипажной части и неподрессоренную массу локомотива (в этом плане примененный на электровозе 2ЭС8 привод с двусторонней тяговой передачей по схеме (рисунок 1, *ж*) является шагом назад по сравнению с приводом интегрированной схемы, примененный ранее на снятом с производства электровозе 2ЭС10).

На основании этого рассмотрим привод агрегатного типа (рисунок 1, *и*) и варианты модернизации привода интегрированного типа, подобные применяемому на электровозе 2ЭС10 (см. рисунок 1, *з*). Поскольку в опорно-осевых приводах соотношение расстояния от вала ТЭД до оси колесной пары к расстоянию от точки подвеса ТЭД до оси колесной пары равно 0,5, что ниже соотношения от проекций на горизонтальную плоскость расстояния от вала осевого редуктора до колесной пары и расстояния от точки подвеса редуктора до оси колесной пары ранее рассмотренного выше опорно-рамного привода с осевым редуктором, равного 0,63. В первом приближении можно принять, что при использовании упругого звена максимальная динамическая составляющая крутящего момента в опорно-осевом приводе будет составлять примерно 0,8 от полученной при исследованиях опорно-рамного привода с осевым редуктором, т. е. 0,4...0,45 от осевой силы тяги электровоза 2ЭС10 в часовом режиме.

В предложенном опорно-осевом приводе агрегатной компоновки [17] осевой редуктор выполнен в виде отдельного узла и связан шарнирным соединением с корпусом ТЭД, опирающегося на ось через моторно-осевые подшипники (рисунок 2). Это упрощает изготовление редуктора и привода в целом по сравнению с конструкциями, разработанными фирмами Siemens и Bombardier, позволяет использовать одинарную упруго-компенсирующую муфту, размещенную снаружи основных узлов привода (поскольку компенсируются только

несоосности при монтаже), и иметь ту же максимальную частоту вращения ТЭД (так как диаметр вала не приходится увеличивать для размещения внутри него торсиона).

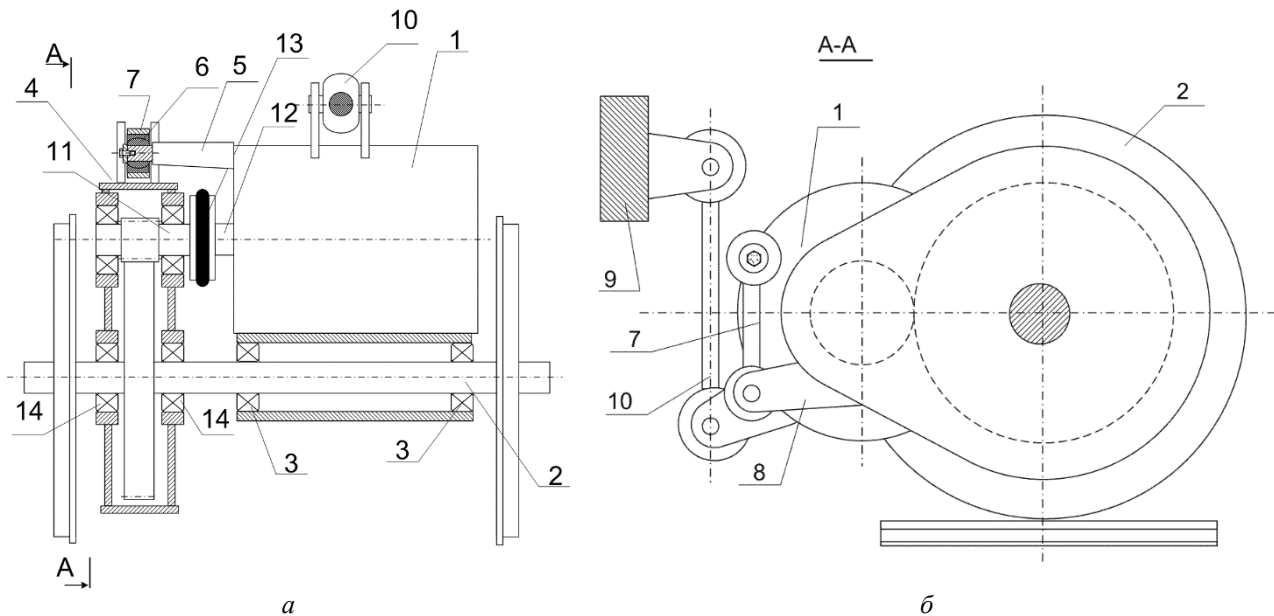


Рисунок 2 – Опорно-осевой привод агрегатной компоновки: *а* – общий вид; *б* – вид со стороны осевого редуктора; 1 – ТЭД; 2 – колесная пара; 3, 14 – подшипники; 4 – осевой редуктор; 5 – кронштейн с пальцем; 6 – сферический шарнир; 7 – подвеска; 8 – кронштейн осевого редуктора; 9 – рама тележки; 10 – подвеска ТЭД; 11 – вал осевого редуктора; 12 – вал ТЭД; 13 – упругокомпенсационная муфта

На варианты приводов такого типа получен ряд патентов на полезные модели, например, [18].

Что касается приводов интегрированной компоновки, то в нашей стране еще в 80-е гг. прошлого века велась работа по созданию цилиндрических тонкослойных резинометаллических элементов (ТРМЭ), которые имеют радиальную жесткость, сопоставимую с жесткостью металла, при незначительном сопротивлении на кручении [19]. Был предложен вариант привода с интегрированной компоновкой, в котором ротор ТЭД опирается через ТРМЭ на подшипники осевого редуктора (рисунок 3).

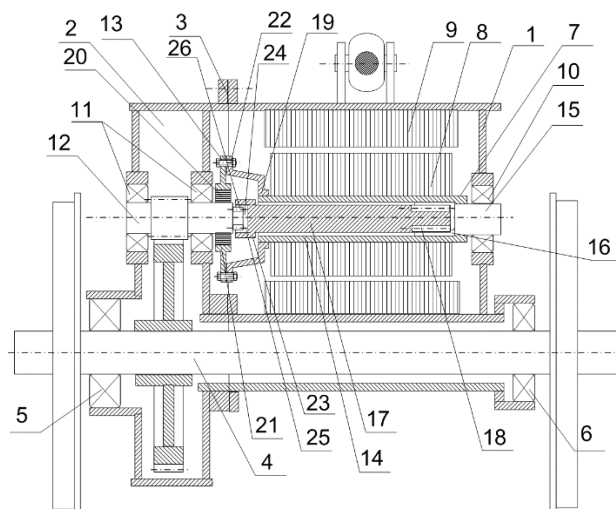


Рисунок 3 – Тяговый привод интегрированной компоновки с торсионным валом в полем валу ротора: 1 – ТЭД; 2 – осевой редуктор; 3 – разъемное соединение; 4 – ось колесной пары; 5, 6 – осевые подшипники; 7 – вал ТЭД; 8 – ротор ТЭД; 9 – статор ТЭД; 10 – роторный подшипник; 11 – подшипники осевого редуктора; 12 – вал осевого редуктора; 13 – мембранная муфта; 14 – гильза; 15 – хвостовик; 16 – шлицы гильзы; 17 – торсионный вал; 18 – наружные шлицы торсионного вала; 19 – цилиндрический выступ; 20 – цилиндрический тонкослойный резинометаллический элемент; 21 – стакан; 22 – болтовое соединение; 23 – утолщение; 24 – цилиндрическая выемка; 25 – внутренние шлицы; 26 – наружные шлицы вала редуктора

Это позволяет не увеличивать диаметр хвостовика вала ротора и внутренний диаметр подшипника (чтобы не снижать максимальную частоту вращения ТЭД по условиям нагрева подшипника) и передавать крутящий момент с ротора ТЭД на вал редуктора через торсионный вал в полом роторе. Авторами подана заявка на получение патента на конструкцию данного привода.

Другой предложенный вариант представляет собой видоизмененную схему опорно-центрального привода, в котором плоские резинокордные упругие элементы служат только для передачи крутящего момента, а полый вал опирается на ось колесной пары через ТРМЭ. Это позволяет уменьшить наружный диаметр полого вала и упростить его размещение между осью и корпусом ТЭД. На этот вариант привода также подана заявка на получение патента.

*Модернизация конструктивных схем опорно-рамных приводов.* Аналогично конструктивным схемам опорно-осевых приводов рассмотрим варианты конструкции, позволяющие применять высокооборотный ТЭД, т. е. схему (см. рисунок 1, д).

Повышение нагрузочной способности и ресурса зубчатой муфты возможно благодаря уменьшению несоосности валов ТЭД и шестерни осевого редуктора, вследствие чего уменьшается угол перекоса полумуфт и может быть увеличен требуемый радиус бочкообразности зубьев внутреннего венца, что в свою очередь снижает контактные напряжения на поверхности зубьев. Это может быть достигнуто за счет применения жесткой связи корпуса осевого редуктора с рамой тележки, но при этом необходимо размещение упругой связи в другом месте.

Предложен вариант конструкции привода с размещением упругих элементов в колесном центре (рисунок 4).

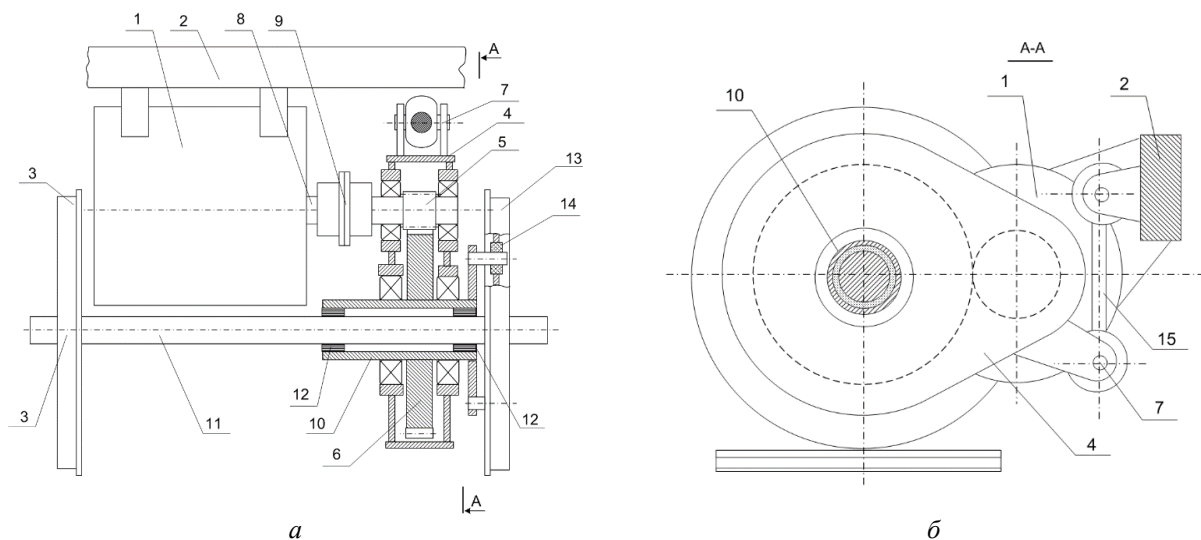


Рисунок 4 – Тяговый привод с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором с размещением упругих элементов в колесном центре: а – общий вид; б – вид со стороны осевого редуктора; 1 – ТЭД; 2 – рама тележки; 3 – колесная пара; 4 – осевой редуктор; 5 – шестерня; 6 – большое зубчатое колесо; 7 – узел подвески редуктора; 8 – вал ТЭД; 9 – зубчатая муфта; 10 – полый вал; 11 – ось колесной пары; 12 – тонкослойные резинометаллические элементы; 13 – колесный центр; 14 – упругие элементы; 15 – двухшарнирная тяга

В предложенном варианте привода осевой редуктор опирается на ось колесной пары через полый вал и ТРМЭ, которые одновременно обеспечивают высокую жесткость связи редуктора с осью в радиальном направлении и не препятствуют повороту полого вала относительно оси колесной пары на некоторый угол, соответствующий деформации упругих элементов в колесном центре. При этом упругие элементы в колесном центре в отличие от рассмотренного выше опорно-центрального привода разгружены от действия радиальных нагрузок, а их расположение в колесном центре обеспечивает удобство осмотра и замены в эксплуатации. На конструкцию привода также подана заявка на получение патента.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.



1. Установлено, что для локомотивов с опорно-осевым приводом, не имеющим упругого звена в валопроводах, при движении по пути с волнообразным износом, ухудшение сцепления колес с рельсами за счет влияния динамической составляющей крутящего момента в тяговом приводе при прохождении вертикальных неровностей пути может составлять 20 %, что является одним из препятствий для полного использования тяговых свойств грузовых электровозов с асинхронными ТЭД. Определены возможные варианты конструкции тяговых приводов, для которых указанную проблему можно считать решенной, и рассмотрена целесообразность использования данных конструктивных решений для модернизации существующего парка электровозов.

2. На основании проведенного анализа конструкций тяговых приводов установлено, что применение для электровозов тягового привода с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и тяговой передачи, как это предполагалось делать в 70-е – 80-е гг. прошлого века, может быть целесообразным в случае создания высокомоментных ТЭД с осевым магнитным потоком.

3. Установлено, что применение для электровозов тягового привода с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором позволяет предотвратить ухудшение сцепления от действия динамической составляющей крутящего момента. Недостатками данного решения являются необходимость внесения изменений в конструкцию рамы тележки и ограничение возможности увеличить частоту вращения ротора ТЭД для снижения массы ТЭД.

4. Доказано, что для модернизации имеющегося парка грузовых электровозов с асинхронными ТЭД целесообразно применять опорно-осевой привод с упругим звеном, не требующий внесения изменений в конструкцию рамы тележки. В связи с тем, что существующие конструкции упругих зубчатых колес имеют недостаточную долговечность, проведен поиск новых вариантов размещения упругих элементов в опорно-осевом приводе.

5. Предложен ряд новых конструкций тяговых приводов электровоза:

опорно-осевой тяговый привод агрегатной компоновки, в котором упругий элемент представляет собой одинарную упруго-компенсирующую муфту;

варианты конструкции опорно-осевого тягового привода интегрированной компоновки с применением тонкослойных резинометаллических элементов и размещением упругих элементов в полом якоре или на колесных центрах;

вариант конструкции опорно-рамного тягового привода с двойной зубчатой муфтой и размещением упругих элементов в диске колесного центра.

### *Список литературы*

1. Развитие локомотивной тяги / под ред. Н. А. Фуфрянского и А. И. Бевзенко. – Москва : Транспорт, 1982. – 303 с. – Текст : непосредственный.

2. Бирюков, И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – Москва : Транспорт, 1986. – 256 с. – Текст : непосредственный.

3. Иванов, В. Н. Влияние динамики тягового привода локомотива на волнообразный износ рельсов / В. Н. Иванов, А. И. Беляев. – Текст : непосредственный // Труды МИИТа. – 1971. – Вып. 363. – С. 3–11.

4. Беляев, А. И. Исследование колебаний якоря тягового двигателя ЭД-107 / А. И. Беляев, В. И. Тютин, В. Ш. Джамалов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1971. – № 5. – С. 17–21.

5. Беляев, А. И. Экспериментальное определение динамических характеристик тягового привода тепловоза 2ТЭ10Л / А. И. Беляев. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1972. – № 2. – С. 9–14.

6. Калихевич, В. Н. Тяговые приводы локомотивов. Устройство, обслуживание, ремонт / В. Н. Калихевич. – Москва : Транспорт, 1983. – 111 с. – Текст : непосредственный.

7. Анализ и разработка конструктивных решений экипажной части для повышения тяговых свойств локомотивов / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев. – Текст : непосредственный // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 6 (18). – С. 52–62. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-6-52-62. – EDN VOIGZK.
8. Повышение тягово-цепных свойств локомотивов путем совершенствования экипажной части / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров [и др.]. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2024. – Т. 22. – № 2 (111). – С. 47–68. – DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-2-6. – EDN VBSCEY.
9. Михайлов, Г. И. Повышение надежности и несущей способности зубчатых тяговых передач : научная монография / Г. И. Михайлов. – Казань : Алгоритм +, 2023. – 560 с. – Текст : непосредственный.
10. Расширенная классификация механической части тяговых приводов локомотивов / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров [и др.]. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 2. – С. 60–68. – EDN EYWPAF.
11. Методы поиска оптимальных параметров динамической системы тягового привода в процессе выбора вариантов конструкции / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 2 (38). – С. 90–100. – EDN NFXPKW.
12. Сергиенко, П. Е. Экспериментальные исследования тягового привода электровоза ВЛ84 / П. Е. Сергиенко, В. М. Остапенко. – Текст : непосредственный // Электровозостроение. – 1982. – Т. 22. – С. 115–125.
13. Двухслойные сферические резинометаллические шарниры и проблемы расчета их характеристик / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81. – № 2. – С. 114–124. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-2-114-124. – EDN BFFSRA.
14. Грузовой тепловоз ER20CF для Литвы // Железные дороги мира. – 2009. – № 5. – С. 17–24. – Текст : непосредственный.
15. Повышение надежности экипажной части тепловозов / под ред. Л. К. Добрынина. – Москва : Транспорт, 1984. – 248 с. – Текст : непосредственный.
16. Разработка опорно-осевого привода пассажирских электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев. – Текст : непосредственный // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 3 (15). – С. 45–58. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-3-45-58. – EDN VHIJMG.
17. Применение агрегатных тяговых приводов для локомотивов с повышенными тяговыми свойствами / А. С. Космодамианский, А. А. Пугачев, В. И. Воробьев [и др.]. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2023. – № 2 (77). – С. 41–48. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-2-41-48. – EDN BHTLWI.
18. Патент на полезную модель № 223262 U1 Российская Федерация, МПК В61С 9/50, В61F 15/16. Тяговый привод локомотива : № 2023126944 : заявлено 18.10.2023 : опубликовано 09.02.2024 / Злобин С. Н., Воробьев В. И., Измеров О. В., Копылов С. О., Николаев Е. В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева».
19. Дудник, В. В. Конструкция вертолетов / В. В. Дудник. – Ростов-на-Дону : Издательский дом ИУИ АП, 2005. – 158 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. Fufryansky N.A. and Bevzenko A.I. ed. *Razvitie lokomotivnoi tiagi* [Development of locomotive traction]. Moscow, Transport Publ., 1982, 303 p. (In Russian).

2. Biryukov I.V., Belyaev A.I., Rybnikov E.K. *Tiagovyye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznodorozhnyih dorog* [Traction drives of railway electric rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1986, 256 p. (In Russian).

3. Ivanov V.N., Belyaev A.I. *Vlijanie dinamiki tjagovogo privoda lokomotiva na volnovoj shornoe iznos rel'sov* [The influence of the dynamics of the locomotive drive on wave wear of rails]. *Trudy MIIT – Proceedings of MIIT*, 1971, iss. 363, pp. 3-II. (In Russian).

4. Belyaev A.I., Tyutin V.I., Djamalov V.Sh. *Issledovanie kolebanij yakora tyagovogo dvigatelya ED-107* [Research into vibrations of the rotor of the ED-107 traction motor]. *Vestnik VNIIZhT – Bulletin of VNIIZhT*, 1971, no. 5, pp. 17-21. (In Russian).

5. Belyaev A.I. *Eksperimental'noye opredeleniye dinamicheskikh harakteristik tiagovogo privoda teplovoza 2TE10L* [Experimental determination of dynamic characteristics of traction drive of diesel locomotive 2TE10L]. *Vestnik VNIIZhT – Bulletin of VNIIZhT*, 1972, no. 2, pp. 9-14. (In Russian).

6. Kalikhevich V.N. *Tiagovyye privody lokomotivov. Ustroistvo, obsluzhivanie, remont* [Locomotive Traction Drives. Construction, Maintenance, Repair]. Moscow, Transport Publ., 1983, 111 p. (In Russian).

7. Pugachev A., Vorob'ev V., Izmerov O., Nikolaev E. Analysis and development of constructive solutions of crew parts to improve locomotive traction properties. *Transportnoe mashinostroenie – Transport engineering*, 2023, no. 6(18), pp. 52-62. <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2023-6-52-62>. EDN VOIGZK. (In Russian).

8. Kosmodamiansky A.S., Vorobyov V.I., Izmerov O.V., Nikolaev E.V., Shevchenko D.N. Improving locomotive traction and adhesion properties by improving the undercarriage. *Mir transporta – World Of Transport And Transportation*, 2024, vol. 22, no. 2(111), pp. 47-68. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-6>. EDN VBSCEY. (In Russian).

9. Mikhaylov G.I. *Povyshenie nayadnosti i nessushchey sposobi zubchatykh tyagovykh peredach* [Increase of reliability and load-bearing capacity of gears of traction transmissions]. Kazan', Algoritm+ Publ., 2023, 560 p. (In Russian).

10. Kosmodamiansky A.S., Vorobyov V.I., Izmerov O.V., Shevchenko D.N., Nikolaev E.V. Extended classification of mechanical part of locomotive traction drives. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology in Transport*, 2022, no. 2, pp. 60-68. EDN EYWPAF. (In Russian).

11. Kosmodamianskii A.S., Vorobyev V.I., Izmerov O.V., Kapustin M.U., Shevchenko D.N. Optimization method for dynamic system of locomotive traction drive, based on the base point method. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 2(38), pp. 90-100. EDN NFXPKW. (In Russian).

12. Sergienko P.E., Ostapenko V.M. Experimental studies of the traction drive of an electric locomotive VL84. *Elektrovozostroyeniye – Electric Locomotive Building*, 1982, vol. 22, pp. 115-125. (In Russian).

13. Kosmodamianskiy A.S., Vorob'ev V.I., Izmerov O.V., Shevchenko D.N., Rasin D.Yu. Two-layer spherical rubber-metal joints and problems of their calculation features. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2022, vol. 81, no. 2, pp. 114-124. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-114-124>. EDN BFFSRA. (In Russian).

14. Freight Diesel Locomotive ER20CF for Lithuania. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world*, 2009, no. 5, pp. 17-24. (In Russian).

15. Dobrynin L.K. ed. *Povyshenie nadezhnosti ekipazhnoi chasti teplovozzov* [Improvement of reliability of running gear of diesel locomotives]. Moscow, Transport Publ., 1984, 248 p. (In Russian).

16. Pugachev A., Vorob'ev V., Izmerov O., Nikolaev E. Development of a support-axial drive of passenger electric trains with asynchronous traction engines. *Transportnoe mashinostroenie –*

*Transport engineering*, 2023, no. 3(15), pp. 45-58. <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2023-3-45-58>. EDN VHIJMG. (In Russian).

17. Kosmodamianskiy A.S., Pugachev A.A., Vorobyev V.I., Izmerov O.V., Nikolaev E.V. Application of aggregate traction drives for locomotives with increased traction properties. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2023, no. 2(77), pp. 41-48. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-2-41-48>. EDN BHTLWI (In Russian).

18. Zlobin S.N., Vorob'ev V.I., Izmerov O.V., Kopylov S.O., Nikolaev E.V. *Patent RU 223262 U1*, 09.02.2024.

19. Dudnik V.V. *Konstrukciia vertoletov* [Helicopter Design]. Rostov-on-Don, Publishing House IUAP, 2005, 158 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Космодамианский Андрей Сергеевич**

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Часовая ул., д. 22/2, г. Москва, 125993, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав», РОАТ РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 649-19-00.

E-mail: askosm@mail.ru

### **Карпов Артем Евгеньевич**

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Часовая ул., д. 22/2, г. Москва, 125993, Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав», РОАТ РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (999) 606-08-40.

E-mail: akarpov576@gmail.ru

### **Фатеев Андрей Анатольевич**

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Часовая ул., д. 22/2, г. Москва, 125993, Российская Федерация.

Соискатель кафедры «Тяговый подвижной состав», РОАТ РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (920) 212-74-75.

E-mail: miitlok@bk.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Космодамианский, А. С. Модернизация тягового привода грузовых электровозов с целью улучшения сцепных свойств / А. С. Космодамианский, А. Е. Карпов, А. А. Фатеев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 48 – 59.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Kosmodamiansky Andrey Sergeevich**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Chasovaya st., 22/2, Moscow, 125993, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department “Traction rolling stock”, ROAT RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-00.

E-mail: askosm@mail.ru

### **Karpov Artem Evgenievich**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Chasovaya st., 22/2, Moscow, 125993, the Russian Federation

Assistant of the department “Traction rolling stock”, ROAT RUT (MIIT).

Phone: +7 (999) 606-08-40.

E-mail: akarpov576@gmail.ru

### **Fateev Andrey Anatolyevich**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Chasovaya st., 22/2, Moscow, 125993, the Russian Federation

Applicant for the department “Traction rolling stock”, ROAT RUT (MIIT).

Phone: +7 (920) 212-74-75.

E-mail: miitlok@bk.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kosmodamiansky A.S., Karpov A.E., Fateev A.A. Modernization of traction drives of freight electric locomotives to improve adherence properties. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 48-59. (In Russian).

Г. М. Менакер, О. Е. Пудовиков

Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА С ФУНКЦИЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЗА

**Аннотация.** Описана математическая модель для адаптивной системы автоматического управления тормозом грузового поезда с применением расширенного фильтра Калмана (ЕКФ) для идентификации реальных параметров поезда и тормозной системы. Для оценки качества работы предложенной системы автоматического управления был выполнен имитационный эксперимент с вероятностной постановкой задачи исследования с использованием модели разработанной САУ ПТ. Целью выполненного эксперимента является определение вероятностных характеристик случайной величины отклонения координаты остановки поезда от заданного значения. Определение достаточности количества выполненных расчетов для достоверного определения статистических характеристик в данном исследовании выполнено с использованием методики определения границ доверительных интервалов выборочных среднего и дисперсии для выполненного количества расчетов. Получены гистограммы распределения величины отклонения от заданной точки остановки при прицельном торможении поезда с выключенным и включенным алгоритмом ЕКФ. Для оценки вероятности превышения величиной отклонения координат остановки от заданного значения подобраны теоретические законы распределения случайной величины и проверены по критерию согласия  $n\omega^2$ . Показано, что без применения предложенного алгоритма идентификации параметров тормозной системы и поезда (расширенного фильтра Калмана (ЕКФ)) величина отклонения от заданной точки остановки при прицельном торможении поезда может привести к серьезному нарушению безопасности движения поездов.

Предложенная система автоматического управления пневматическим тормозом обеспечивает высокое качество управления, позволяя повысить точность прицельного остановочного торможения поезда в заданную координату пути.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания от 20.03.2025 № 103-00001-25-02.

**Ключевые слова:** автоматическое управление, пневматический тормоз, математическое моделирование, фильтр Калмана.

Grigory M. Menaker, Oleg E. Pudovikov

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

## AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR PNEUMATIC BRAKING OF A FREIGHT TRAIN WITH BRAKER PARAMETER IDENTIFICATION FUNCTION

**Abstract.** A mathematical model has been developed for an adaptive automatic brake control system for a freight train using an Extended Kalman Filter (EKF) to identify the actual parameters of the train and its braking system. To evaluate the performance of the proposed automatic control system, a simulation experiment was carried out using a probabilistic formulation of the research problem and the developed automatic brake control model. The purpose of the experiment is to determine the probabilistic characteristics of the random variable representing the deviation of the train's stopping coordinate from the specified value. The adequacy of the number of simulation runs for obtaining reliable statistical characteristics in this study was determined using a method for estimating the confidence interval bounds for the sample mean and variance for the given number of trials. Histograms were obtained for the distribution of stopping-point deviation during targeted braking with the EKF algorithm switched off and on. To estimate the probability that the stopping-point deviation exceeds the specified limit, a theoretical distribution law for the random variable was selected and verified using the  $n\omega^2$  goodness-of-fit test. It is shown that without the proposed algorithm for identifying braking system and train parameters (the Extended Kalman Filter, EKF), the deviation from the target stopping point during precision braking can lead to serious violations of train-operation safety.

The proposed automatic pneumatic brake control system provides high-quality control, improving the accuracy of targeted stopping of a train at a specified track coordinate.

The work was carried out at the expense of budget financing within the framework of the state assignment No. 103-00001-25-02 dated 20.03.2025.

**Keywords:** automatic control, pneumatic brake, mathematical modeling, Kalman filter.

Железные дороги Российской Федерации играют важную роль в обеспечении грузоперевозок. Одним из путей, позволяющих увеличить грузооборот, является увеличение длины и массы поездов, что требует совершенствования технических средств железнодорожного транспорта, в том числе и тормозов подвижного состава, а также систем управления ими.

Особенностью пневматических тормозных систем железнодорожного подвижного состава является значительное отклонение их фактических параметров от расчетных значений, обусловленное как особенностями конструкции, так и их содержания в условиях эксплуатации. Данные отклонения вызваны, например, изменением плотности тормозной магистрали, отклонением величины коэффициента трения в паре «колодка – колесо», изменением величины потерь в тормозной рычажной передаче, а также рядом прочих причин. Все это приводит к значительному снижению качества управления скоростью при использовании пневматической тормозной системы и созданию предпосылок для возникновения ситуаций, угрожающих безопасности движения поездов, заключающихся в превышении установленной скорости движения на перегонах, в местах постоянных и временных ограничений скорости, при выполнении регулировочных и прицельных, в том числе остановочных, торможений.

В этих условиях особую актуальность приобретают системы автоматического управления, способные минимизировать негативное воздействие перечисленных выше факторов на безопасность движения поездов. В настоящее время на железнодорожном транспорте применяются системы автоматического ведения поездов (САВП), построенные по многоконтурному принципу. Внешний контур САВП реализует энергооптимальную траекторию движения поезда при заданном времени хода, минимизируя расход топливно-энергетических ресурсов на тягу. Внутренние контуры САВП обеспечивают управление исполнительными устройствами – тяговым электроприводом и пневматическим тормозом.

Одной из составляющих энергооптимальной траектории движения поезда является режим стабилизации скорости, в том числе в режиме торможения с использованием пневматического тормоза для поддержания скорости на «вредных» спусках, а также режим прицельного торможения. Известно, однако, что при использовании пневматического тормоза точность прицельного и регулировочного торможения зависит от опыта работы машиниста и является ограниченной, кроме этого, как отмечалось, на нее влияет случайный характер изменения параметров тормозной системы в эксплуатации, ведущий к нерациональному выбору моментов начала торможения и отпуска тормозов. Неправильный выбор момента начала торможения или отпуска напрямую влияет на безопасность движения, создавая предпосылки к превышению установленных скоростей движения поезда по перегону, а также к проезду запрещающих сигналов светофоров. Предпринимаемые при ручном управлении меры, позволяющие предотвратить данные угрозы, заключаются в заблаговременном снижении скорости движения, при этом нахождение в режиме торможения происходит намного дольше, чем требуется для обеспечения заданной скорости на перегоне. Также и в случае прицельного торможения возможно применение большей, чем необходимо, ступени торможения и избыточное снижение скорости. Все это помимо угрозы безопасности движению ведет к снижению технической скорости движения и к повышенному износу элементов тормозной системы.

Влияние перечисленных выше факторов на процесс управления торможением поезда с использованием пневматического тормоза можно устранить применением средств автоматизации управления пневматическим тормозом грузового поезда.

Вопросами автоматизации управления торможением занимались Л. А. Баранов [1], В. И. Головин [2], Л. М. Жебрак [3], Ю. Г. Кутыев [2], Е. В. Комков [4], М. Ю. Капустин [5], Б. Д. Никифоров [2], О. Е. Пудовиков [6 – 9], А. Н. Савоськин [1, 10] и другие отечественные и зарубежные ученые.

При разработке алгоритмов управления пневматическим тормозом (ПТ) и последующем анализе их функционирования удобно использовать методы математического моделирования.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Авторами ранее была разработана система автоматического управления (САУ) пневматической тормозной системы грузового поезда [7, 8]. Разработанная САУ ПТ позволяет поддерживать заданную скорость на «вредных» спусках с учетом заданного ограничения скорости движения на перегоне, а также реализует функцию прицельного торможения. В данной системе для выбора момента изменения режима работы пневматического тормоза (торможение, перекрыша, отпуск) выполняется тормозной расчет с использованием усредненных, так называемых расчетных значений параметров тормозной системы (расчетные тормозной коэффициент и нажатие). Предложенная система не способна обеспечить необходимое качество регулирования скорости движения с использованием пневматического тормоза из-за имеющихся расхождений между фактическими и расчетными параметрами тормозной системы, а также величины сопротивления движению вагонов, также являющейся случайной величиной. С целью улучшения качества управления в ранее предложенную систему внедрена дополнительная подсистемами с функцией идентификации параметров пневматического тормоза и адаптации параметров САУ к реальным параметрам тормозной системы и поезда.

Функциональная схема системы автоматического управления приведена на рисунок 1.

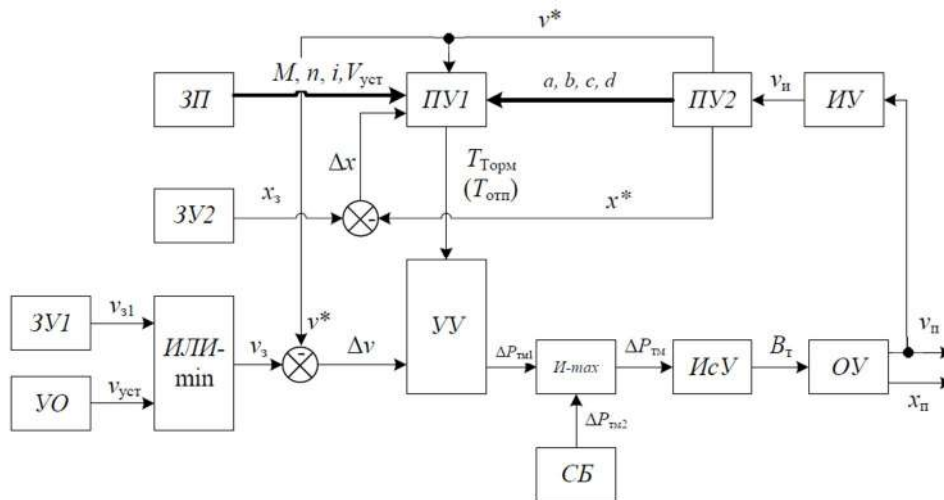


Рисунок 1 – Функциональная схема системы автоматического управления пневматическим тормозом

Сигнал о величине заданной скорости движения  $v_{з1}$ , поступающий от вышестоящего контура регулирования времени хода САВП, вводится в САУ ПТ через задающее устройство ЗУ1 и поступает на вход устройства ИЛИ-min, на другой вход которого поступает сигнал  $v_{уст}$  об ограничении скорости от устройства ограничения (УО), связанного с системой безопасности. Устройство ИЛИ-min выбирает наименьший из входных сигналов. Далее значение заданной скорости  $v_з$  поступает на вход устройства сравнения, где вычисляется рассогласование между ним и величиной фактической (измеренной) скорости  $v^*$ . Измеренная скорость поступает с выхода измерительного устройства (ИУ), являющегося датчиком скорости с частотно-импульсной модуляцией. Сигнал с выхода датчика скорости содержит шум, обусловленный методической погрешностью измерительного тракта, для фильтрации которого применен фильтр скользящего среднего, являющийся составной частью промежуточного устройства ПУ2. Величина рассогласования  $\Delta v$  поступает на вход устройства управления (УУ), выходным сигналом которого является заданное значение величины изменения давления в тормозной магистрали поезда  $\Delta P_{тп1}$ . Для соблюдения ограничения скорости на заданном участке система производит выбор момента начала торможения и отпуска тормозов, который осуществляется в промежуточном устройстве ПУ1. Для определения момента выбора режима работы тормозной системы в ПУ1 производится упреждающий тормозной расчет, в котором используются «точечная» модель поезда, учитывающая силы сопротивления движению, вычисленные на основании данных,

поступающих с электронной карты, и расчетные значения сил торможения [11]. При этом алгоритм работы САУ ПТ может варьироваться в зависимости от режима торможения поезда.

Так, при реализации прицельного регулировочного торможения выполняются следующие операции:

расчет момента времени для разрядки тормозной магистрали, обеспечивающий предотвращение превышения заданного ограничения скорости, непосредственно перед которым осуществляется регулировочное торможение;

расчет момента времени для отпуска тормозов, гарантирующего соблюдение установленного скоростного предела (без превышения заданного предела скорости), в том числе в условиях многократного применения торможения при движении по затяжному спуску.

В случае прицельного остановочного торможения осуществляются

расчет момента времени для разрядки тормозной магистрали при выполнении остановочного торможения;

блокировка отпуска тормозов в ранее активированном режиме регулировочного торможения в случае возникновения риска проезда координаты заданной точки остановки.

После поступления команды на вход УУ от ПУ1 о начале торможения ( $T_{\text{торм}}$ ) или отпуска ( $T_{\text{отп}}$ ) вырабатывается сигнал величины разрядки тормозной магистрали поезда ( $\Delta P_{\text{ТМ1}}$ ) и поступает на вход устройства И-тах, вместе с тем на другой вход И-тах приходит сигнал  $\Delta P_{\text{ТМ2}}$  от локомотивных приборов системы безопасности (СБ). Выходным сигналом устройства И-тах является наибольшая из поступивших на его вход величин  $\Delta P_{\text{ТМ1}}$  и  $\Delta P_{\text{ТМ2}}$ . В качестве объекта управления принята многомассовая модель поезда [2, 12], а в роли исполнительного механизма выступает пневматическая тормозная система, в модели которой учитываются конечная скорость распространения тормозной волны вдоль состава, временные параметры наполнения и опорожнения тормозных цилиндров (ТЦ), а также запаздывание срабатывания воздухораспределителей, возрастающее по мере удаления от локомотива [13].

Алгоритм и подробная методика упреждающего расчета для остановочного и регулировочного торможения, а также результаты исследования работы алгоритма блокировки отпуска во время регулировочного торможения при приближении к заданной точке остановки приведены в источнике [9].

Как отмечалось ранее, для повышения точности управления необходимо учитывать актуальное состояние тормозной системы подвижного состава. Известно, что на эффективность торможения, а следовательно, и на величину тормозного пути существенное влияние оказывают такие факторы, как величина коэффициента трения  $\varphi_k$  в паре «колодка – колесо», механические потери в передаточных механизмах тормозной системы, а также ряд других эксплуатационных параметров [15], различных для каждого вагона поезда и изменяющихся в процессе движения поезда.

При выполнении тяговых расчетов используют усредненный параметр, характеризующий эффективность тормозной системы, а именно расчетный тормозной коэффициент [11], определяемый по формуле:

$$\vartheta_p = \frac{\sum K_p}{Q + P_y}, \quad (1)$$

где  $\sum K_p$  – сумма расчетных сил нажатия на тормозные оси поезда, тс;

$Q$  – масса состава, т;

$P_y$  – учетная масса локомотива, т.

Отличие величины расчетного тормозного коэффициента от его фактического значения приведет к существенному отклонению фактического тормозного пути от расчетного значения, поэтому выбор координаты начала торможения с использованием расчетного значения коэффициента создает предпосылки к нарушению безопасности движения поездов.



Для повышения качества управления, а значит, и безопасности движения, в предложенной САУ предусмотрена реализация процедуры идентификации параметров тормозной системы и сопротивления движению поезда, для чего использован расширенный фильтр Калмана ЕКФ [14], являющийся частью ПУ2. Описание работы фильтра расширенного фильтра Калмана для идентификации параметров тормозной системы для предложенной САУ ПТ представлено в работе [9].

Алгоритм оценки параметров сопротивления движению аналогичен алгоритму идентификации параметров тормозной системы поезда, представленному в источнике [9]. Для оценки параметров сопротивления движению в разработанной системе САУ ПТ также использован алгоритм ЕКФ, независимо реализованный в блоке ПУ2. Такое решение снижает вычислительную сложность и избавляет от необходимости учета зависимости между всеми параметрами в матрицах фильтра. Так как сопротивление движению мало по сравнению с тормозной силой, данный фильтр работает только в режиме выбега.

Для оценки качества работы предложенной системы автоматического управления был выполнен имитационный эксперимент с вероятностной постановкой задачи исследования с использованием модели разработанной САУ. Целью выполненного эксперимента является определение вероятностных характеристик случайной величины отклонения координаты остановки поезда от заданного значения. Для этого была выполнена серия из 10000 расчетов с использованием алгоритма ЕКФ и без его использования при выполнении прицельного торможения поезда, состоящего из 70 вагонов массой 6780 т в заданную координату пути, с начальной скоростью 70 км/ч. В качестве начальных условий было задано, что величина коэффициента трения в паре «колодка – колесо» является случайной величиной, распределенной по гауссовскому закону, с математическим ожиданием  $m_\varphi$ , составляющим 0,8 от величины расчетного коэффициента трения и величиной среднеквадратического отклонения  $\sigma_\varphi$  такой, чтобы в соответствии с результатами исследований, опубликованных в работе А. Э. Габидуллина и других [16], выполнялось соотношение  $(m_\varphi \pm 3\sigma_\varphi) \in [0,6\varphi_k, \varphi_k]$ .

Для учета данного условия при выполнении расчетов величины коэффициентов  $a, b, c, d$  в выражении для определения расчетного коэффициента трения для композиционных колодок [12] были представлены в виде случайных величин, распределенных в соответствии с законом Гаусса, значения математического ожидания были приняты равными  $0,8a; 0,8b; 0,8c; 0,8d$  от их расчетной величины, а величина  $\sigma$  выбрана такой, чтобы граница  $m_a + 3\sigma = a; m_b + 3\sigma = b; m_c + 3\sigma = c; m_d + 3\sigma = d$ . Таким образом, случайные величины коэффициентов  $a, b, c, d$  распределены в диапазоне  $[0,6a, a]; [0,6b, b]; [0,6c, c]; [0,6, d]$ .

После завершения серии расчетов при вариации величин коэффициентов трения в паре «колодка – колесо» была получена выборка значений величины отклонения координаты остановки поезда от заданного значения. Определение достаточности количества выполненных расчетов для достоверного расчета статистических характеристик в данном исследовании выполнено с использованием методики определения границ доверительных интервалов выборочных среднего и дисперсии для выполненного количества расчетов [17]:

$$\begin{cases} m_e - t_{q,N-1} \frac{\sigma_e}{\sqrt{N}} < \mu_e < m_e + t_{q,N-1} \frac{\sigma_e}{\sqrt{N}}; \\ \left[ m_e - t_{q,N-1} \frac{\sigma_e}{\sqrt{N}} > (1 - k_{\mu e} m_e) \right] \wedge \\ \wedge \left[ m_e + t_{q,N-1} \frac{\sigma_e}{\sqrt{N}} > (1 + k_{\mu e} m_e) \right]; \end{cases} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N\sigma_e^2}{\chi_{2,p,N-1}^2} < \sigma_e^2 < \frac{N\sigma_e^2}{\chi_{1,p,N-1}^2}; \\ \left[ \frac{N}{\chi_{2,p,N-1}^2} > (1 - k_{\sigma e}) \right] \wedge \left[ \frac{N}{\chi_{1,p,N-1}^2} < (1 + k_{\sigma e}) \right]. \end{array} \right. \quad (3)$$

Здесь  $N$  – количество выполненных вариантов расчета;

$k_{\mu e}, k_{\sigma e}$  – величина допустимого отклонения границ доверительного интервала исследуемой величины от значения самой исследуемой величины, математического ожидания и дисперсии;

$t_{q,N-1}$  – коэффициент, используемый для вычисления двустороннего доверительного интервала для оценки математического ожидания,  $q$  – доверительный уровень;

$\chi_{2,p,N-1}^2, \chi_{1,p,N-1}^2$  – коэффициенты, используемые для вычисления нижней и верхней границ интервала для оценки дисперсии,  $p$  – доверительный уровень;

$m_e, \sigma_e^2$  – выборочные среднее и дисперсия величины отклонения  $e$  координаты остановки от расчетного значения.

Достаточность количества расчетов  $N_{\text{вых}}$  определялась на основании выбора максимального числа из множеств найденных значений  $N_{\mu ei}$  и  $N_{\sigma ei}$ :

$$N_{\text{вых}} = \max(N_{\mu ei}, N_{\sigma ei}). \quad (4)$$

Расчеты были выполнены при доверительном уровне для математического ожидания  $q = 0,99$ , а для дисперсии  $q = 0,95$ , при величине допустимого отклонения границы доверительного интервала  $k_{\mu e} = 0,02$  для математического ожидания и  $k_{\sigma e} = 0,02$  для дисперсии соответственно.

На рисунке 2, *а* и *б* приведены графики изменения выборочных среднего и дисперсии совместно с кривыми в зависимости от количества расчетов, границы доверительного интервала и кривые, соответствующие допустимому отклонению границ доверительного интервала от выборочных моментов.

Достаточное количество выполненных расчетов в соответствии с описанной методикой составило для математического ожидания  $N_{\mu e} = 1550$  и  $N_{\sigma e} = 2450$  для дисперсии.

На рисунке 2 использованы следующие обозначения: 1 – зависимость вычисленного значения величины отклонения ( $d$ ) от заданной точки остановки, выборочного среднего для математического ожидания (см. рисунок 2, *а*) и выборочной дисперсии (см. рисунок 2, *б*); 2 – границы доверительных интервалов; 3 – границы допустимого отклонения доверительных интервалов.

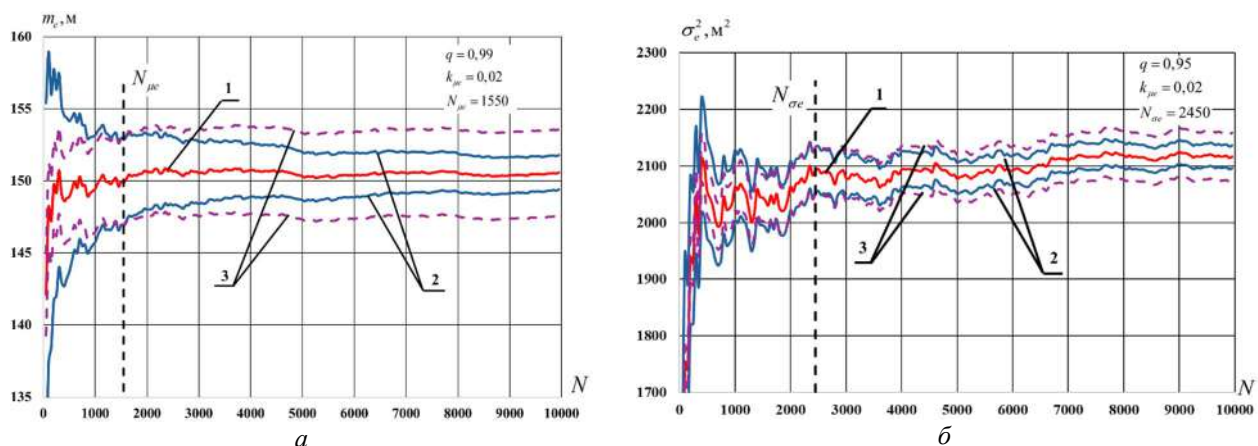


Рисунок 2 – Описание методики по выбору количества вариантов расчета

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Дополнительным критерием для определения достаточности количества выполненных расчетов является достижение графиками выборочных моментов (см. рисунок 2) установившихся значений. По данному критерию величина расчетов для математического ожидания 6000 вариантов и 7000 вариантов для дисперсии.

Таким образом, завершение цикла расчетов возможно только при выполнении следующих условий: необходимо, чтобы значения рассматриваемых моментов случайной величины стабилизировались, при этом число проведенных циклов вычислений должно быть не меньше значения, определенного выражением (4).

На рисунках 3 и 4 приведены гистограммы распределения величины отклонения от заданной точки остановки при прицельном торможении поезда с выключенным алгоритмом ЕКФ (см. рисунок 3) и включенным (см. рисунок 4). Для оценки вероятности превышения величиной отклонения координат остановки от заданного значения необходимо выбрать теоретический закон распределения случайной величины. Так как необходимо выполнить оценку наибольшей величины отклонения, которая может превышать найденное в результате имитационного эксперимента наибольшее выборочное значение, необходимым условием при выборе закона распределения случайной величины помимо достаточного соответствия выборке, которое будет проверено с использованием критерия согласия, является отсутствие правой границы области определения функции распределения данной случайной величины. Поэтому целесообразно использовать законы с областью определения  $[+\infty; -\infty]$ .

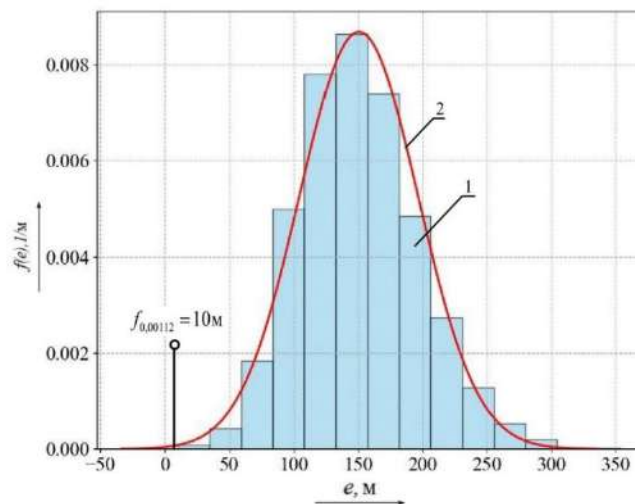


Рисунок 3 – Гистограмма распределения величин отклонения от заданной точки остановки при прицельном торможении без применения алгоритма ЕКФ (1), кривая плотности распределения (2) и значение квантиля  $x_{\{0,00112\}} = 10$  м

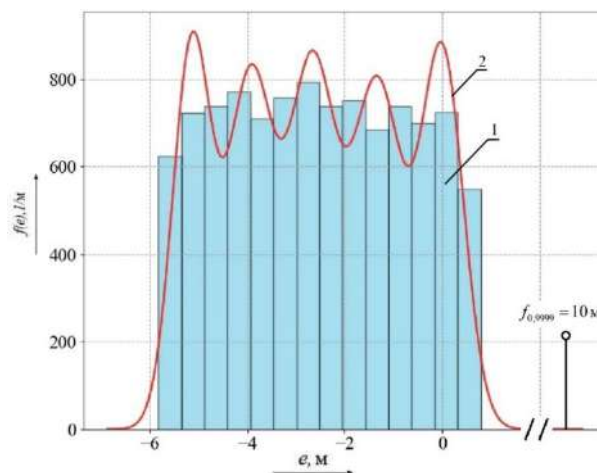


Рисунок 4 – Гистограмма распределения величин отклонения от заданной точки остановки при прицельном торможении с применением алгоритма ЕКФ (1), подобранная суперпозиция плотностей закона распределения Гаусса (2)

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для описания распределения величины отклонения от заданной точки остановки, полученной без использования алгоритма ЕКФ, удобно использовать закон распределения Гаусса, плотность распределения вероятности которого описывается выражением [18]:

$$f(e) = \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(e - \mu_e)^2}{2\sigma_e^2}\right), \quad (5)$$

где  $\mu_e$  – математическое ожидание;

$\sigma_e$  – среднее квадратическое отклонение;

$\sigma_e^2$  – дисперсия;

$e$  – случайная величина

Параметры закона были найдены с использованием метода максимального правдоподобия модели и составили:  $\mu_e = 150,53$  м;  $\sigma_e = 46$  м.

Отметим, что минимальное выборочное значение, найденное в результате выполнения имитационного эксперимента, составило 10,1 м, а максимальное – 353,4 м.

Проверку гипотезы о допустимости использования данного закона для сглаживания выборочных данных выполним с использованием критерия мощности, записанным в виде [19]:

$$n\omega^2 = \frac{1}{12n_r} + \sum_{i=1}^{n_r} [F(e_i) - F_{cr}(e_i)]^2, \quad (6)$$

где  $n_r$  – количество интервалов гистограммы;

$F(e_i)$ ,  $F_{cr}(e_i)$  – значения теоретического и статического законов распределения, взятые в середине  $i$ -го интервала гистограммы.

Если фактическое значение  $n\omega^2$  окажется больше критического  $n\omega_{кр}^2$  или будет равно ему при принятом уровне значимости  $\alpha$ , то гипотеза о возможности сглаживания данных отвергнута. При уровне значимости  $\alpha = 0,1$  критическое значение критерия  $n\omega_{кр}^2 = 0,347$  [20].

Вычисленное по формуле (6) значение критерия составило:  $n\omega^2 = 0,0076 < n\omega_{кр}^2$ .

Таким образом, гипотеза о возможности сглаживания статистической выборки величин отклонения координаты точки остановки от заданного значения без использования фильтра ЕКФ законом распределения Гаусса с найденными параметрами не противоречит имеющимся данным.

Гистограмма плотности распределения величины отклонения от заданной точки остановки, полученной с использованием алгоритма ЕКФ, удовлетворительно может быть описана  $\beta$ -распределением. Вместе с тем использование данного распределения недопустимо, так как оно имеет ограниченную область определения. В этой связи для описания плотности распределения величины отклонения от заданной точки остановки, полученной с использованием алгоритма ЕКФ, в настоящей работе использован закон распределения, представляющий собой суперпозицию (сумму) плотностей закона распределения Гаусса, которая имеет вид:

$$f(e) = \sum_{i=1}^k w_{ei} \cdot N(e | \mu_{ei}, \sigma_{ei}^2), \quad (7)$$

где  $N = \frac{1}{\sigma_{ei} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(e - \mu_{ei})^2}{2\sigma_{ei}^2}\right)$  – плотность вероятности распределения Гаусса;

$e$  – случайная величина;

$w_{ei}$  – вес  $i$ -й компоненты;

$\mu_{ei}$  – математическое ожидание  $i$ -й компоненты, при этом  $\sum_{i=1}^k w_{ei} = 1$ ;

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$\sigma_{ei}$  – среднеквадратическое отклонение  $i$ -й компоненты;

$\sigma_{ei}^2$  – дисперсия  $i$ -й компоненты;

$k$  – число компонент суммы.

Параметры компонент суммы закона распределения Гаусса определялись с использованием метода максимального правдоподобия модели, число компонент суммы ( $k$ ) определялось исходя из условия достижения значения критерия согласия  $n\omega^2 \leq n\omega_{кр}^2 = 0,347$  для уровня значимости  $\alpha = 0,1$  и составили следующие значения:

компонента 1:  $w_{e1} = 0,1825$ ;  $\mu_{e1} = -5,1358$ ;  $\sigma_{e1} = 0,3922$ ;

компонента 2:  $w_{e2} = 0,1978$ ;  $\mu_{e2} = -0,0036$ ;  $\sigma_{e2} = 0,4349$ ;

компонента 3:  $w_{e3} = 0,2118$ ;  $\mu_{e3} = -2,6636$ ;  $\sigma_{e3} = 0,4857$ ;

компонента 4:  $w_{e4} = 0,1979$ ;  $\mu_{e4} = -3,9363$ ;  $\sigma_{e4} = 0,4670$ ;

компонента 5:  $w_{e5} = 0,2100$ ;  $\mu_{e5} = -1,3274$ ;  $\sigma_{e5} = 0,5072$ .

Отметим, что минимальное выборочное значение, найденное в результате выполнения имитационного эксперимента, составило  $-5,82$ , а максимальное  $-0,75$ .

Проверку гипотезы о допустимости использования суммы законов распределения Гаусса для сглаживания выборочных данных выполним с использованием критерия мощности Крамера – Мизеса – Смирнова  $n\omega^2$  [20]. При уровне значимости  $\alpha = 0,1$  критическое значение критерия  $n\omega_{кр}^2 = 0,347$ .

$$n\omega^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[ F(\delta_i) - \frac{i-0,5}{n} \right]^2, \quad (8)$$

где  $n$  – размер выборки;

$\delta_{ei}$  – элемент выборки;

$F(\delta_{ei})$  – значение теоретической функции распределения, вычисленной в точке  $\delta_{ei}$ ;

$(i-0,5)/n$  – вероятность появления  $i$ -го элемента выборки.

Если фактическое значение  $n\omega^2$  окажется больше критического  $n\omega_{кр}^2$  или будет равно ему при принятом уровне значимости  $\alpha$ , то гипотеза о возможности сглаживания данных будет отвергнута. При уровне значимости  $\alpha = 0,1$  критическое значение критерия  $n\omega_{кр}^2 = 0,347$  [20].

Для суммы распределений Гаусса по данной выборке получаем следующий наименьший  $n\omega^2$ :

$$n\omega^2 = 0,19 < n\omega_{кр}^2.$$

Таким образом, гипотеза о возможности сглаживания имеющейся выборки значений отклонений координаты точки остановки от заданного значения при помощи закона распределения, представляющего собой суперпозицию законов Гаусса с найденными параметрами, не противоречит имеющимся данным.

Для оценки вероятности появления отклонения точки остановки поезда при прицельном торможении поезда без использования алгоритма ЕКФ с величиной, большей, чем максимально допустимая, равная 10 м, которую реализует система САУТ-ЦМ/485 [21], был вычислен квантиль распределения, соответствующий координате 10 м. Значение вероятности, соответствующее данной координате, составило  $1,12 \cdot 10^{-3}$  ( $f_{0,00112} = 10$  м). Таким образом, вероятность проезда поезда заданной точки остановки без выполнения идентификации фактических параметров тормозной системы составляет  $1 - 1,12 \cdot 10^{-3} = 0,99888$ .

Аналогично найдена вероятность превышения координатой остановки поезда, полученной с реализацией процедуры идентификации, максимально допустимого значения, для чего был использован закон распределения случайной величины (сумма законов распределения Гаусса) с найденными параметрами, которая не превысила значение 0,0001.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что выполнение идентификации параметров тормозной системы позволяет определить фактическую эффективность пневматического тормоза поезда и, как следствие, значительно повысить качество управления скоростью в режиме прицельного торможения, заключающееся в существенном уменьшении разброса координаты (с **343,3 м до 5,07 м**), при которой достигается целевое значение скорости. Также существенно повышается точность выполнения торможения, заключающаяся в минимизации отклонения координаты фактического достижения целевого значения скорости от расчетного значения. Таким образом, предлагаемые решения способствуют значительному повышению безопасности движения поездов.

*Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания от 20.03.2025 № 103-00001-25-02.*

## Список литературы

1. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом. Часть 1: Теория автоматического управления / Л. А. Баранов, А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 400 с. – Текст : непосредственный. – EDN XMSUAL.
2. Никифоров, Б. Д. Автоматизация управления торможением поездов / Б. Д. Никифоров, В. И. Головин, Ю. Г. Кутыев. – Москва : Транспорт, 1985. – 263 с. – Текст : непосредственный.
3. Патент № 2715915 С2 Российская Федерация, МПК В60Т 8/172, В61L 3/12. Способ и система управления пневматическими тормозами железнодорожного подвижного состава : № 2017143208 : заявлено 11.12.2017 : опубликовано 04.03.2020 / Жебрак Л. М., Сафро М. В.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Смартвиз». – Текст : непосредственный. – EDN NDQIKZ.
4. Комков, Е. В. Учет загрузки поезда метрополитена при автоматическом прицельном торможении / Е. В. Комков. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1984 – № 3. – С. 15–17.
5. Капустин, М. Ю. Модель адаптивной системы прицельного электропневматического торможения поезда / М. Ю. Капустин, С. И. Краснолобов, П. С. Саркисян. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 4. – С. 33–43. – EDN ОКCAPN.
6. Пудовиков, О. Е. Совершенствование системы автоматического управления пневматическим тормозом грузового длинносоставного поезда / О. Е. Пудовиков, С. А. Муров. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2014. – № 4. – С. 21–26. – EDN SESEXR.
7. Пудовиков, О. Е. Система управления пневматическим тормозом грузового поезда / О. Е. Пудовиков, Г. М. Менакер. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2023. – № 9. – С. 34–39. – EDN DORPWT.
8. Пудовиков, О. Е. Автоматическое управление пневматическим тормозом грузового поезда / О. Е. Пудовиков, Г. М. Менакер. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные транспортные системы : материалы II междунар. науч.-практ. конф., Москва, 25 мая 2023 г. / Российский университет транспорта. – Москва, 2023. – С. 322–329. – EDN ZXZHMG.
9. Менакер, Г. М. Адаптивная система автоматического управления пневматическим тормозом грузового поезда / Г. М. Менакер, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2 (98). – С. 132–144. – EDN ITAVLX.
10. Савоськин, А. Н. Параметрическая оптимизация автоматического регулятора пневматического торможения грузового поезда / А. Н. Савоськин, П. Е. Коваль, В. В. Лосев. – Текст : непосредственный // Фундаментальные проблемы динамики и прочности подвижного состава : юбилейный сборник научных трудов. – Москва : МИИТ, 1997. – № 912. – С. 93–96.
11. Правила тяговых расчетов для поездной работы : утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р в редакции Распоряжения ОАО «РЖД» от 09.02.2018 № 182/р. – Москва : ОАО «Российские железные дороги», 2018. – 516 с. – Текст : непосредственный.

12. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер [и др.] ; под ред. Е. П. Блохина. – Москва : Транспорт, 1986. – 263 с. – Текст : непосредственный.
13. Асадченко, В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава / В. Р. Асадченко. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте; Маршрут, 2006. – 392 с. – Текст : непосредственный. – EDN QBLHVK.
14. Браммер, К. Фильтр Калмана – Бьюси / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 200 с. – Текст : непосредственный.
15. ГОСТ 34434–2018. Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 28 с. – Текст : непосредственный.
16. Расчет зависимости коэффициента трения композиционных гребневых колодок для локомотивов от силы нажатия и скорости торможения / А. Э. Габидуллин, Д. В. Горский, И. В. Назаров, В. А. Никитин. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79. – № 6. – С. 337–342. – DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-6-337-342. – EDN RDWBHG.
17. Дунин-Барковский, И. В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике / И. В. Дунин-Барковский, Н. В. Смирнов. – Москва : Гос. изд-во. технико-теоретической литературы, 1955. – 556 с. – Текст : непосредственный.
18. Хан, Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро. – Москва : Мир, 1969. – 397 с. – Текст : непосредственный.
19. Савоськин, А. Н. Вероятностные методы в задачах динамики, прочности и безотказности рельсовых экипажей / А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак, Д. А. Бондаренко ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. Н. Савоськина. – Москва : Альянс, 2022. – 612 с. – Текст : непосредственный. – EDN UUXPUW.
20. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с. – Текст : непосредственный.
21. Аппаратура локомотивная системы автоматического управления торможением поездов САУТ-ЦМ/485 : руководство по эксплуатации : Часть 1. – 97Ц.06.00.00-01 РЭ. – Екатеринбург : ООО «НПО САУТ», 2022. – 81 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Baranov L.A., Savoskin A.N. ed. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia élektropodvizhnym sostavom. Chast' 1: Teoriia avtomaticheskogo upravleniia* [Automated control systems for electric rolling stock. Part 1: Theory of automatic control]. Moscow, Educational and Methodological Center for Railway Transport Education Publ., 2014, 400 p. EDN XMSUAL. (In Russian).
2. Nikiforov B.D., Golovin V.I., Kutjev Yu.G. *Avtomatizatsiia upravleniia tormozheniem poezdov* [Automation of train braking control]. Moscow, Transport Publ., 1985, 263 p. (In Russian).
3. Zhebrak L.M., Safro M.V. *Patent RU 2715915 C2*, 04.03.2020. EDN NDQIKZ.
4. Komkov E.V. Accounting for the loading of a subway train with automatic targeted braking. *Vestnik VNIIZhT – Bulletin of VNIIZhT*, 1984, no. 3, pp. 15-17. (In Russian).
5. Kapustin M.Yu., Krasnolobov S.I., Sarkisian P.S. Model of adaptive electropneumatic train braking system. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology in Transport*, 2011, no. 4, pp. 33-43. EDN OKCAPN. (In Russian).
6. Pudovikov O.E., Murov S.A. Improvement of the control system for pneumatic brake of a long freight train. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik – Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*, 2014, no. 4, pp. 21-26. EDN SESEXR. (In Russian).
7. Pudovikov O.E., Menaker G.M. Pneumatic brake control system of a freight train. *Russian Electrical Engineering*, 2023, vol. 94, no. 9, pp. 654-658. <https://doi.org/10.3103/s1068371223090122>. EDN YURFOU. (In Russian).

8. Pudovikov O.E., Menaker G.M. [Automatic control of the pneumatic brake of the freight train]. *Intellektual'nye transportnye sistemy : materialy II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Intelligent transport systems : proceedings of the II International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2023, pp. 322-329. EDN ZXZHMG. (In Russian).
9. Menaker G.M., Pudovikov O.E. Adaptive automatic control system for the pneumatic brake of a freight train. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2025, no. 2(98), pp. 132-144. EDN ITAVLX. (In Russian).
10. Savoskin A.N., Koval P.E., Losev V.V. Parametric optimization of the automatic regulator of pneumatic braking of a freight train. *Fundamental problems of dynamics and strength of rolling stock : jubilee collection of scientific papers*, Moscow, 1997, no. 912, pp. 93-96. (In Russian).
11. Rules of traction calculations for train operation: approved by the Order of JSC "Russian Railways" dated 12.05.2016 no. 867r as amended by the Order of JSC "Russian Railways" dated 09.02.2018 no. 182/r. Moscow, JSC "Russian Railways" Publ., 2018. 516 p. (In Russian).
12. Blokhin E.P. ed. *Raschety i ispytaniia tiazhelovesnykh poezdov* [Calculations and tests of heavy trains]. Moscow, Transport Publ., 1986, 263 p. (In Russian).
13. Asadchenko V.R. *Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava* [Automatic brakes of rolling stock]. Moscow, Marshrut Publ., 2006, 392 p. EDN QBLHBK. (In Russian).
14. Brammer K., Ziffling G. *Fil'tr Kalmana – B'iusi* [Kalman – Busey Filter]. Moscow, Science. The main editorial office of the physico-mathematical literature Publ., 1982, 200 p. (In Russian).
15. GOST 34434–2018. Braking systems of freight railway wagons. Technical requirements and calculation rules. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 28 p. (In Russian).
16. Gabidullin A.E., Gorskiy D.V., Nazarov I.V., Nikitin V.A. Calculation of the dependence of friction coefficient of locomotive composite ridge brake shoes on pressing force and braking speed. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2020, vol. 79, no. 6, pp. 337-342. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-337-342>. EDN RDWBHG. (In Russian).
17. Dunin-Barkovsky I.V., Smirnov N.V. *Teoriia veroiatnostei i matematicheskaya statistika v tekhnike* [Probability theory and mathematical statistics in engineering]. Moscow, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature Publ., 1955, 556 p. (In Russian).
18. Khan G., Shapiro S. *Statisticheskie modeli v inzhenernykh zadachakh* [Statistical models in engineering problems]. Moscow, Mir Publ., 1969, 397 p. (In Russian).
19. Savoskhin A.N. ed. *Veroiatnostnye metody v zadachakh dinamiki, prochnosti i bezotkaznosti rel'sovykh ekipazhei* [Probabilistic methods in problems of dynamics, strength, and reliability of rail vehicles]. Moscow, The Alliance Publ., 2022, 612 p. EDN UUXPUW. (In Russian).
20. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Tables of mathematical statistics]. Moscow, Science. The main editorial office of the physico-mathematical literature Publ., 1983, 416 p. (In Russian).
21. Locomotive apparatus of the SAUT-CM/485 automatic train braking control system: user manual 97C.06.00.00-01 RE. Part 1. Ekaterinburg, NPO SAUT LLC Publ., 2022, 81 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Менакер Григорий Максимович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, ГСП-4, 125190, Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Электропоезда и локомотивы», ПУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (915) 018-05-21.

E-mail: g.menaker@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Menaker Grigory Maksimovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obraztsova st., Moscow, GSP-4, 125190, the Russian Federation.

Assistant of the department "Electric multiple-unit trains and locomotives", RUT (MIIT).

Phone: +7 (915) 018-05-21.

E-mail: g.menaker@mail.ru



**Пудовиков Олег Евгеньевич**

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, ГСП-4, 125190, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (916) 182-78-24.

E-mail: olegep@mail.ru

**Pudovikov Oleg Evgenievich**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obraztsova st., Moscow, GSP-4, 125190, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department "Electric multiple-unit trains and locomotives", RUT (MIIT).

Phone: +7 (916) 182-78-24.

E-mail: olegep@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Менакер, Г. М. Система автоматического управления пневматическим торможением грузового поезда с функцией идентификации параметров тормоза / Г. М. Менакер, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 60 – 72.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Menaker G.M., Pudovikov O.E. Automatic control system for pneumatic braking of a freight train with braker parameter identification function. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 60-72. (In Russian).

УДК 629.4.027.35

**А. Н. Савоськин, А. П. Васильев**

Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРУЖИНЫ, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННОЙ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ГАСИТЕЛЕМ КОЛЕБАНИЙ, НА ДИССИПАТИВНЫЕ СИЛЫ ГАСИТЕЛЯ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИНАМИКИ В БУКСОВОЙ СТУПЕНИ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ РЕЛЬСОВОГО ЭКИПАЖА

**Аннотация.** Целью данной работы является оценка влияния жесткости пружины, последовательно включенной с гидравлическим гасителем колебаний, на диссипативные силы в гидравлическом гасителе, а также на коэффициенты динамики в буксовой ступени рессорного подвешивания. В качестве объекта исследования рассматривается одноосная трехмассовая модель с двухступенчатым рессорным подвешиванием, соответствующая четырехосной секции грузового электровоза. Моделируются вертикальные колебания подпрыгивания кузова, тележек и колесных пар экипажа при случайном кинематическом возмущении в виде неровности пути и двух вариантах конструкции буксовой ступени рессорного подвешивания: с типовым и упругозащищенным (предлагаемым) гидравлическими гасителями. При моделировании учитываются также упругие и диссипативные свойства пути, приведенные к одной колесной паре. Возмущение задавалось выражениями спектральных плотностей неровностей отдельно в низкочастотном и высокочастотном диапазонах. Решение уравнений колебаний выполнено в частотной области с определением вещественной, мнимой и амплитудной частотных характеристик диссипативных сил типового и упругозащищенного гасителей колебаний в буксовой ступени рессорного подвешивания, связывающих кинематическое возмущение с изменением сил указанных гасителей. Проверка эффективности последовательного включения пружины с гидравлическим гасителем колебаний выполнялась на основе исследования динамических свойств упрощенной трехмассовой модели локомотива с типовым и упругозащищенным гасителями колебаний. Кроме того, на основе исследования случайных процессов вертикальных колебаний такой модели определялись значения показателей динамических качеств и максимальных динамических сил, действующих на гасители. По результатам расчетов были сделаны выводы о значительном снижении динамических сил в упругозащищенном гасителе по сравнению с типовым при незначительном ухудшении показателей динамических качеств, которые в обоих вариантах расчета не превышают своих допустимых значений. Рекомендовано окончательные выводы сделать после решения задачи оптимизации параметров рессорного подвешивания на полноразмерной модели экипажа.

**Ключевые слова:** жесткость пружины, упругозащищенный гидравлический гаситель, вертикальные колебания, амплитудная частотная характеристика, спектральная плотность колебаний, показатели динамических качеств.

Anatoly N. Savoskin, Andrei P. Vasilev

Russian University of Transport RUT (MIIT), Moscow, the Russian Federation

## THE INFLUENCE OF A SERIES CONNECTED SPRING PARAMETERS WITH A HYDRAULIC VIBRATION DAMPER ON THE DISSIPATIVE FORCES OF THE DAMPER AND THE DYNAMICS COEFFICIENTS IN THE FIRST LEVEL OF THE RAIL VEHICLE SPRING SUSPENSION

**Abstract.** The objective of this work is to evaluate the influence of a series connected spring deflection rate with a hydraulic vibration damper on the dissipative forces of the damper and the dynamics coefficients in the first level of the rail vehicle spring suspension. The object of research is a single-axle three-mass model with two spring suspension levels which corresponds to a four-axle section of an electric freight locomotive. The vertical vibrations of the rolling stock car body, bogies and wheelsets are simulated with a random kinematic disturbance which is the rail irregularities. These simulations perform with two design variants of the spring suspension stage: with a conventional and an elastic-protected hydraulic damper. The simulation also takes into account the elastic and dissipative properties of the track under the wheelset. The perturbation was determined by expressions of the spectral densities of irregularities separately for the low-frequency and high-frequency ranges. The solution of the vibration equations is performed in the frequency domain with the determination of the real, imaginary and amplitude frequency characteristics of the dissipative forces of conventional and elastically protected hydraulic vibration dampers linking the kinematic perturbation with a change in the forces of these dampers. The effectiveness of series connected spring with a hydraulic vibration damper was verified based on a study of the dynamic properties of a simplified three-mass model of a locomotive with a standard and elastically protected vibration dampers. In addition, based on a study of random processes of vertical vibrations of such a model, the values of the dynamic quality parameters were determined, as well as the maximum dynamic forces acting on the dampers. Based on the calculation results, conclusions were made about a significant decrease in the dynamic forces in the elastically protected damper compared to the standard one with an insignificant deterioration in the dynamic quality parameters, which in both calculation options do not exceed their permissible values. It is recommended that the final conclusions be made after solving the problem of optimizing the parameters of the spring suspension on a full-size model of the vehicle.

**Keywords:** spring deflection rate, elastically protected damper, vertical vibrations, gain-frequency characteristic, spectral vibration density, dynamic quality parameters.

В настоящее время преждевременный выход из строя гидравлических гасителей, установленных в буксовой ступени рессорного подвешивания, является актуальной проблемой, оказывающей влияние на надежность и безопасность эксплуатации современных грузовых электровозов. Статистика по таким отказам по данным, например, депо г. Иркутска говорит о том, что только за 2020 – 2021 гг. их число составило 968, из них 90 % отказов пришлось на гидравлические гасители буксовой ступени.

Одним из действенных методов снижения динамических сил, действующих на гаситель, и повышения его работоспособности является включение последовательно с гасителем пружины (упругозащищенный гаситель) [1]. Результаты исследования работы такого гасителя на упрощенных одномассовой и трехмассовой динамических моделях представлены в работах [3, 6]. В данных работах рассмотрено исследование влияния жесткости последовательно включенной пружины на работу упругозащищенного гасителя в буксовой ступени рессорного подвешивания одноосной трехмассовой модели секции электровоза 2ЭС4К (рисунок 1).

В соответствии с рисунком 1 колесная пара массой  $m_1$  безотрывно катится по неровности  $\eta(x = vt)$  дискретного рельсового пути и вместе с массой пути  $m_{\text{п}}$  совершает вертикальные колебания подпрыгивания на величину  $z_1$ . При этом масса пути перемещается на величину  $z_{\text{п}} = z_1 - \eta(x = vt)$ .

Массы  $m_2$  тележки и  $m_3$  кузова, приходящиеся на одну колесную пару, совершают колебания подпрыгивания соответственно  $z_2$  и  $z_3$ . Таким образом, данная система имеет три степени свободы.

Дифференциальные уравнения колебаний исследуемых систем с типовым и упруго-защищенным гасителями были составлены на основе использования принципа возможных мощностей и общего уравнения динамики системы. При этом силы инерции соответствующих тел системы были определены по уравнению Лагранжа второго рода. Например, для системы с типовым гасителем (см. рисунок 1) дифференциальные уравнения колебаний имеют вид:

$$\begin{cases} (m_1 + m_{\Pi}) \ddot{z}_1 + (\beta_1 + \beta_{\Pi}) \dot{z}_1 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_{\Pi}) z_1 - \beta_1 \dot{z}_2 - \varepsilon_1 z_2 = m_{\Pi} \ddot{\eta} + \beta_{\Pi} \dot{\eta} + \varepsilon_{\Pi} \eta; \\ -\beta_1 \dot{z}_1 - \varepsilon_1 z_1 + m_2 \ddot{z}_2 + (\beta_1 + \beta_2) \dot{z}_2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) z_2 - \beta_2 \dot{z}_3 - \varepsilon_2 z_3 = 0; \\ -\beta_2 \dot{z}_2 - \varepsilon_2 z_2 + m_3 \ddot{z}_3 + \beta_2 \dot{z}_3 + \varepsilon_2 z_3 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

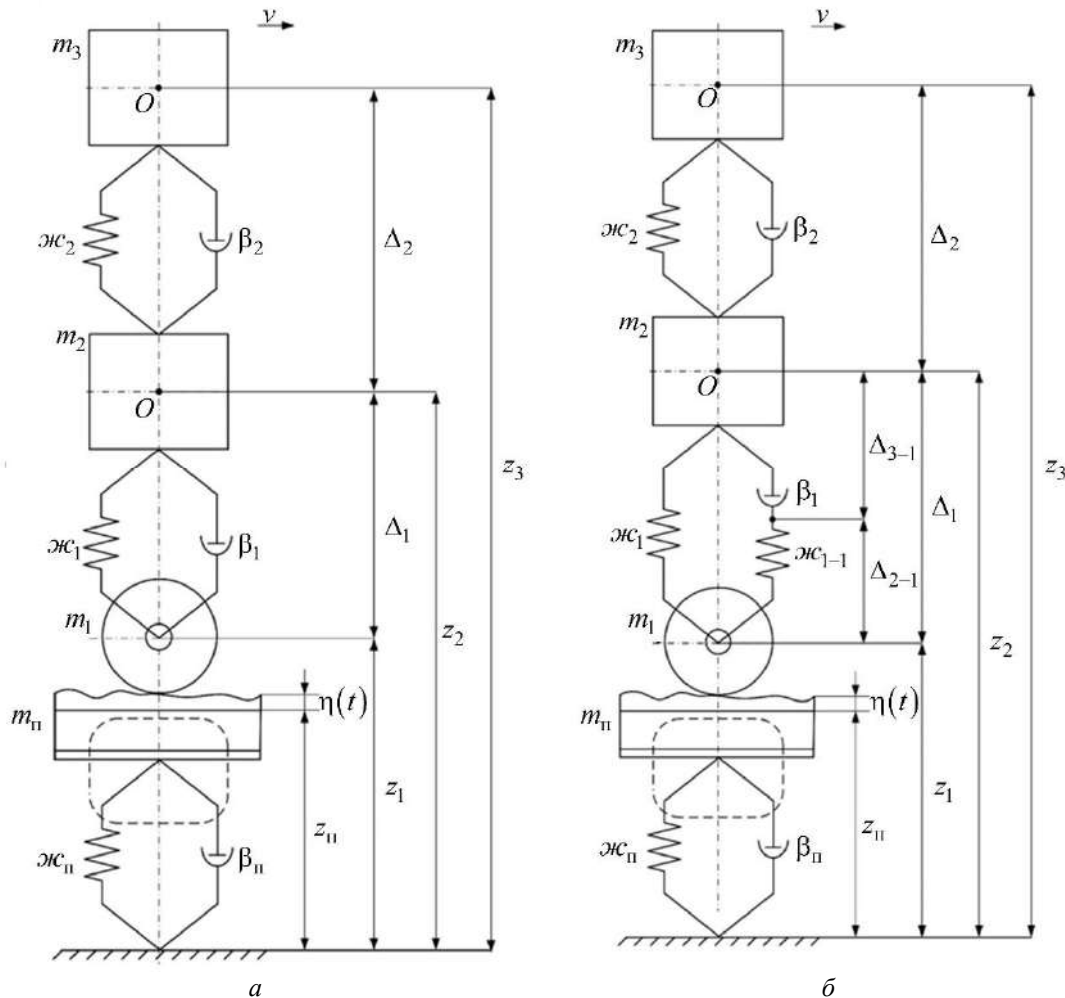


Рисунок 1 – Кинематические схемы трехмассовых моделей экипажа с типовой схемой включения гидравлического гасителя колебаний (а) и с упругозащищенным гасителем (б) для исследования их вертикальных колебаний при движении по дискретному рельсовому пути

По этим уравнениям были найдены частотные характеристики исследуемых систем [1].

Для системы с типовой схемой включения гасителя колебаний частотная характеристика (ЧХ)  $W_{F_{\Pi}-\eta}(j\omega)$ , связывающая диссипативную силу гидравлического гасителя колебаний  $F_{\Pi}(j\omega)$  с возмущением  $\eta(j\omega)$ , определяется по выражению:

$$\begin{aligned} W_{F_{\Pi}-\eta}(j\omega) &= -j\omega\beta_1\Delta_1(j\omega) = -j\omega\beta_1[z_2(j\omega) - z_1(j\omega)] = \\ &= -j\omega\beta_1[W_{z_2-\eta}(j\omega) - W_{z_1-\eta}(j\omega)], \end{aligned} \quad (2)$$

где ЧХ  $W_{z_1-n}(j\omega)$  и  $W_{z_2-n}(j\omega)$  определяются следующими уравнениями:

$$W_{z_1-n}(j\omega) = \frac{[1 - W_{2-3}(j\omega)W_{3-2}^*(j\omega)]W_{1-n}^*(j\omega)}{[1 - W_{2-3}(j\omega)W_{3-2}^*(j\omega) - W_{1-2}(j\omega)W_{2-1}^*(j\omega)]}; \quad (3)$$

$$W_{z_2-n}(j\omega) = \frac{W_{2-1}^*(j\omega)W_{1-n}^*(j\omega)}{1 - W_{2-3}(j\omega)W_{3-2}^*(j\omega) - W_{1-2}(j\omega)W_{2-1}^*(j\omega)}. \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) парциальные частотные характеристики имеют вид:

$$W_{1-n}^*(j\omega) = \frac{\varepsilon_n - m_n \omega^2 + j\omega\beta_n}{\varepsilon_1 + \varepsilon_n - (m_1 + m_n)\omega^2 + j\omega(\beta_1 + \beta_n)}; \quad (5)$$

$$W_{1-2}(j\omega) = \frac{\varepsilon_1 + j\omega\beta_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_n - (m_1 + m_n)\omega^2 + j\omega(\beta_1 + \beta_n)}; \quad (6)$$

$$W_{2-1}^*(j\omega) = \frac{\varepsilon_1 + j\omega\beta_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - m_2 \omega^2 + j\omega(\beta_1 + \beta_2)}; \quad (7)$$

$$W_{2-3}(j\omega) = \frac{\varepsilon_2 + j\omega\beta_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - m_2 \omega^2 + j\omega(\beta_1 + \beta_2)}; \quad (8)$$

$$W_{3-2}^*(j\omega) = \frac{\varepsilon_2 + j\omega\beta_2}{\varepsilon_2 - m_3 \omega^2 + j\omega\beta_2}. \quad (9)$$

На основе уравнения (2) определим амплитудную частотную характеристику (АЧХ):

$$A_{F_n-n}(f) = \sqrt{[\operatorname{Re}W_{F_n-n}(jf)]^2 + [\operatorname{Im}W_{F_n-n}(jf)]^2}, \quad (10)$$

где  $\operatorname{Re}W_{F_n-n}(jf)$  и  $\operatorname{Im}W_{F_n-n}(jf)$  – вещественная и мнимая составляющие частотной характеристики (2), записанной в функции частоты  $f = \omega/2\pi$ .

График  $A_{F_n-n}(f)$  (рисунок 2), полученный на основе выражений (2) и (10), показывает, что эта характеристика имеет максимум на частоте 25 Гц, значительно превышающий частоту максимума АЧХ диссипативных сил в гидравлическом гасителе колебаний одномассовой системы [3], который при абсолютно жесткой модели пути приходится на собственную частоту колебаний массы. При этом значения АЧХ снижаются при частотах выше 25 Гц, в то время как у АЧХ одномассовой системы значения сначала уменьшаются, а потом неограниченно возрастают.

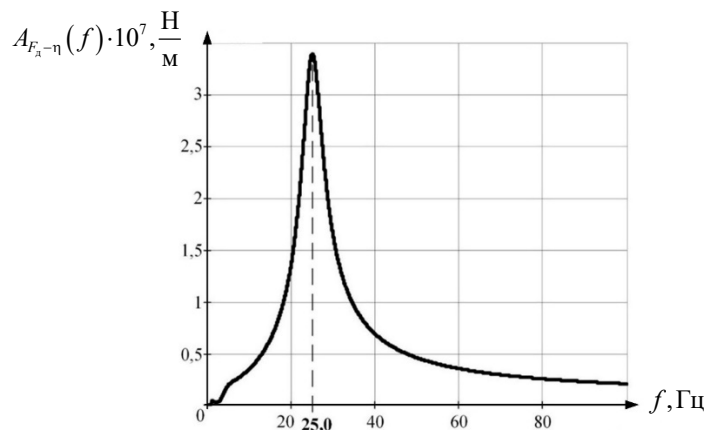


Рисунок 2 – Амплитудная частотная характеристика, связывающая диссипативную силу типового гидравлического гасителя колебаний в буксовой ступени рессорного подвешивания с возмущением в виде геометрических неровностей пути в трехмассовой модели экипажа

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В отличие от этого аналогичная АЧХ этой силы в упругозащищенном гасителе, найденная с учетом соотношений, приведенных в работах [1, 6] (рисунок 3), показывает, что частота наибольшего максимума практически не изменилась и равна 25,1 Гц. Кроме того, на этой АЧХ проявились дополнительные максимумы на частотах колебаний кузова 1,27 Гц и тележки 5,5 Гц.

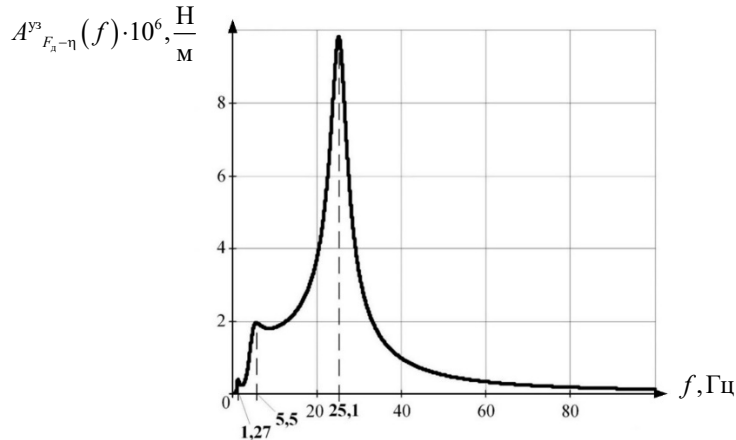


Рисунок 3 – Амплитудная частотная характеристика, связывающая диссипативную силу упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний в буксовой ступени рессорного подвешивания с возмущением в виде геометрических неровностей пути в трехмассовой модели экипажа

Однако амплитуда максимума АЧХ на частоте 25,1 Гц существенно уменьшилась с  $3,4 \cdot 10^7$  Н/м на рисунке 2 до  $9,8 \cdot 10^6$  Н/м на рисунке 3, т. е. в 3,47 раза. Это говорит о возможности решения проблемы повышения работоспособности гидравлического гасителя колебаний.

Далее определялись спектральные плотности случайных процессов сил в типовом и упругозащищенном гасителях в низкочастотной и высокочастотной областях по формуле Шеннона [1, 2]. По этим спектральным плотностям были найдены максимальные значения динамических сил в гасителях и показатели динамических качеств, такие как максимальные значения ускорений кузова и коэффициентов динамики в ступенях рессорного подвешивания [1, 2].

Графики зависимостей от скорости движения этих сил (рисунок 4, а) и коэффициентов динамики в буксовой ступени рессорного подвешивания (рисунок 4, б) при различных значениях жесткости  $\mathcal{J}_{C_{1-1}}$  пружины, включенной последовательно с гидравлическим гасителем (см. рисунок 1, б), показывают следующее.

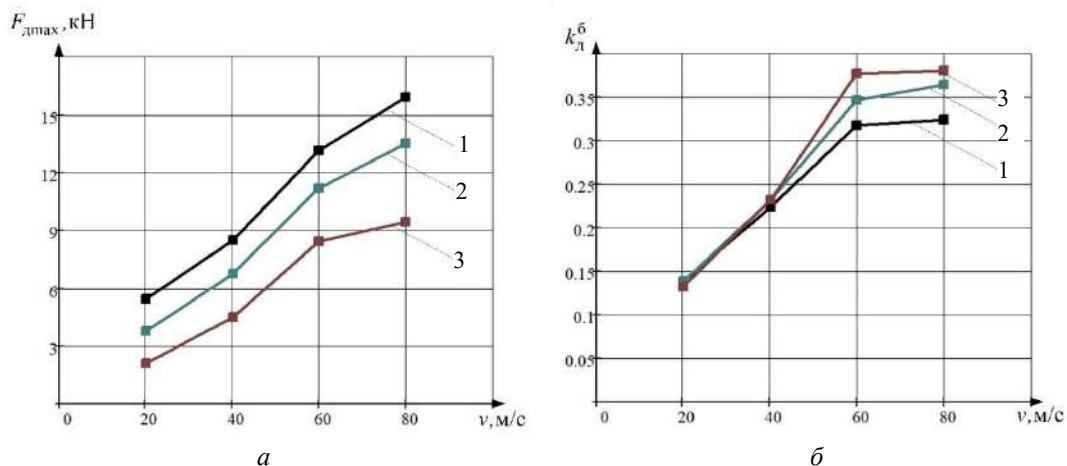


Рисунок 4 – Зависимости от скорости движения максимальных значений динамических сил (а) и коэффициентов динамики в буксовой ступени рессорного подвешивания (б): 1 – схема с типовым гасителем колебаний; 2 – схема с упругозащищенным гасителем при  $\mathcal{J}_{C_{1-1}} = 1,5 \mathcal{J}_C$ ; 3 – при  $\mathcal{J}_{C_{1-1}} = 0,5 \mathcal{J}_C$

Динамические силы в упругозащищенном гасителе при  $\mathcal{J}_{1-1} = 0,5\mathcal{J}_1$  (см. рисунок 4, а, кривая 3) в 2,6 раза меньше, чем в типовом (см. рисунок 4, а, кривая 1) при скорости движения 20 м/с, и в 1,9 раза меньше при скорости движения 40 м/с.

При  $\mathcal{J}_{1-1} = 1,5\mathcal{J}_1$  и тех же скоростях движения динамические силы в упругозащищенном гасителе снижаются в 1,45 раза и в 1,27 раза соответственно (см. рисунок 4, а, кривые 1 и 2). Таким образом, большее снижение сил в гасителе дает схема с соотношением жесткостей  $\mathcal{J}_{1-1} = 0,5\mathcal{J}_1$ .

Вместе с тем значения коэффициентов динамики в модели трехмассовой системы с упругозащищенным гасителем выше, чем с типовым, однако это возрастание незначительно.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Применение упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний при соотношении жесткостей в буксовой ступени  $\mathcal{J}_{1-1} = 0,5\mathcal{J}_1$  позволяет существенно снизить максимальные динамические силы в гасителе во всем эксплуатационном диапазоне скоростей движения.

2. Такое снижение сил повысит безотказность упругозащищенного гасителя и увеличит его межремонтный пробег.

3. Окончательное решение может быть принято после исследования колебаний полной модели электровоза с типовым и упругозащищенным гасителями колебаний.

## Список литературы

1. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак [и др.] ; под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Альянс, 2013. – 440 с. – Текст : непосредственный.

2. Савоськин, А. Н. Вероятностные методы в задачах динамики, прочности и безотказности рельсовых экипажей / А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак, Д. А. Бондаренко. – Москва : Альянс, 2022. – 612 с. – Текст : непосредственный. – EDN UUXPUW.

3. Савоськин, А. Н. Сравнительный анализ показателей динамических качеств и диссипативных сил в гидравлических гасителях колебаний, включенных по типовой схеме и по схеме упругозащищенного гасителя для упрощенной одномассовой модели электровоза / А. Н. Савоськин, А. П. Васильев, А. Ю. Тимченко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 9–17. – EDN GTUNRI.

4. Акишин, А. А. Генерация многомерного случайного процесса возмущений в задачах динамики подвижного состава железных дорог / А. А. Акишин, А. Н. Савоськин. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2015. – № 2-3 (217-222). – С. 71–78. – EDN TZGOVJ.

5. Савоськин, А. Н. Генерирование геометрических неровностей как случайных возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей / А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2024. – Т. 83. – № 1. – С. 24–39. – EDN IRNFWN.

6. Савоськин, А. Н. Применение упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний в рессорном подвешивании локомотивов / А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская, П. Ю. Иванов. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81. – № 2. – С. 134–147. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-2-134-147. – EDN NEAMNL.

7. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях в проектировании пассажирских и грузовых вагонов : РД 32.68-96 : Утв. МПС РФ от 6 января 1997 г. № А-11у. – Москва : МПС РФ, 1997. – 21 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Biryukov I.V. ed. *Mekhanicheskaiia chast' tiagovogo podvizhnogo sostava* [Mechanical part of traction rolling stock]. Moscow, The Alliance Publ., 2013, 440 p. (In Russian).

2. Savoskhin A.N. ed. *Veroiatnostnye metody v zadachakh dinamiki, prochnosti i bezotkaznosti rel'sovykh ékipazheĭ* [Probabilistic methods in problems of dynamics, strength, and reliability of rail vehicles]. Moscow, The Alliance Publ., 2022, 612 p. EDN UUXPUW. (In Russian).

3. Savoskin A.N., Vasilev A.P., Timchenko A.Yu. Comparative analysis of dynamic quality parameters and dissipative forces in hydraulic vibration dampers included according to the standard scheme and according to the scheme of an elastic-protected damper for an electric locomotive simplified single-mass model. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2(58), pp. 9-17. EDN GTUNRI. (In Russian).

4. Akishin A.A., Savoskin A.N. Generating a multidimensional perturbed stochastic process in railways rolling stock dynamics. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie – St. Petersburg State Polytechnical University journal. Computer science. Telecommunications and control systems*, 2015, no. 2-3 (217-222), pp. 71-78. EDN TZGOVJ. (In Russian).

5. Savoskin A.N., Lavlinskaya N.S. Generation of geometric irregularities as random disturbances causing rail cab oscillations. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2024, vol. 83, no. 1, pp. 24-39. EDN IRNFWN. (In Russian).

6. Savos'kin A.N., Lavlinskaya N.S., Ivanov P.Yu. Application of elastically protected hydraulic vibration damper in spring suspension of locomotives. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2022, vol. 81, no. 2, pp. 134-147. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-134-147>. EDN NEAMNL. (In Russian).

7. Calculated railway track irregularities for use in research in the design of passenger and freight wagons : RD 32.68-96 : Approved by Ministry of Railways of the Russian Federation No. A-11u dated January 6, 1997. Moscow, Ministry of Railways of the Russian Federation Publ., 1997. 21 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Савоськин Анатолий Николаевич

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (903) 278-42-50.

E-mail: [elmechtrans@mail.ru](mailto:elmechtrans@mail.ru)

### Васильев Андрей Павлович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (905) 779-97-21.

E-mail: [stud16@yandex.ru](mailto:stud16@yandex.ru)

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Савоськин, А. Н. Влияние параметров пружины, последовательно включенной с гидравлическим гасителем колебаний, на диссипативные силы гасителя и коэффициенты динамики в буксовой ступени рессорного подвешивания рельсового экипажа / А. Н. Савоськин, А. П. Васильев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 72 – 78.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Savoskin Anatoly Nikolaevich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the department “Electric multiple-unit trains and locomotives”, RUT (MIIT).

Phone: +7 (903) 278-42-50.

E-mail: [elmechtrans@mail.ru](mailto:elmechtrans@mail.ru)

### Vasilev Andrei Pavlovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, docent, associate professor of the department “Electric multiple-unit trains and locomotives”, RUT (MIIT).

Phone: +7 (905) 779-97-21.

E-mail: [stud16@yandex.ru](mailto:stud16@yandex.ru)

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Savoskin A.N., Vasilev A.P. The influence of a series connected spring parameters with a hydraulic vibration damper on the dissipative forces of the damper and the dynamics coefficients in the first level of the rail vehicle spring suspension. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 72-78. (In Russian).

М. М. Соколов<sup>1</sup>, А. Г. Ходкевич<sup>1</sup>, К. В. Петракова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Барабинская дистанция сигнализации, централизации и блокировки – структурное подразделение Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», г. Барабинск, Российская Федерация

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ВХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Аннотация.** Работа посвящена возможности определения местоположения железнодорожного подвижного состава на участке железнодорожного пути по значению входного сопротивления рельсовой линии с учетом влияния параметров ее аппаратуры и внешних факторов. Целью работы является оценка возможности использования значения комплексного входного сопротивления участка железнодорожного пути для уточнения местоположения железнодорожного подвижного состава в классических рельсовых цепях. В статье представлены результаты моделирования изменения значений входного сопротивления участка железнодорожного пути на примере кодовой рельсовой цепи частотой 25 Гц, традиционно применяемой на железных дорогах Российской Федерации и стран СНГ. В качестве исходных данных взяты три основных режима расчета рельсовых цепей: нормальный, шунтовой и контрольный. На основании аналитических выражений классической теории рельсовых цепей для этих режимов с применением программного пакета *Smath Studio* получены графики зависимостей значений активной и реактивной составляющих комплексного входного сопротивления от значений сопротивления изоляции, ординаты местоположения железнодорожного подвижного состава и места излома рельса. Результаты моделирования показали, что возможно использовать значение комплексного входного сопротивления участка железнодорожного пути для определения местоположения железнодорожного подвижного состава с точностью 50 метров и определения места излома рельса с точностью 100 м. Полученные результаты могут найти применение при разработке систем отслеживания местоположения подвижного состава, в том числе высокоскоростного, а также в системах диагностирования элементов рельсовой сети, что в целом позволит перейти на системы предиктивного обнаружения отказов.

**Ключевые слова:** рельсовая цепь, путевого участок, местоположение подвижного состава, комплексное входное сопротивление, моделирование.

Maxim M. Sokolov<sup>1</sup>, Anton G. Khodkevich<sup>1</sup>, Ksenija V. Petrakova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Barabinsk signaling, centralization and blocking distance – a structural subdivision of the West Siberian Infrastructure Directorate – a structural subdivision of the West Siberian Railway – a branch of JSC Russian Railways, Barabinsk, the Russian Federation

## ASSESSMENT OF THE CHANGES IN THE INPUT RESISTANCE OF THE RAIL CIRCUIT DURING THE MOVEMENT OF RAILWAY ROLLING STOCK

**Abstract.** This paper examines the feasibility of locating rolling stock on a track section based on the track line's input impedance, taking into account the influence of its hardware parameters and external factors. The aim of the paper is to evaluate the feasibility of using the track section's complex input impedance to pinpoint rolling stock locations in conventional track circuits. The article presents the results of modeling changes in the track section's input impedance using a 25 Hz code track circuit, traditionally used on railways in the Russian Federation and the CIS. Three basic track circuit calculation modes were used as input data: normal, shunt, and control. Using the analytical expressions of classical track circuit theory for these modes and the *Smath Studio* software package, graphs were obtained of the active and reactive components of the complex input impedance versus insulation resistance, the ordinate of the rolling stock's location, and the location of the rail break. The simulation results demonstrated that it is possible to use the complex input impedance of a track section to determine the location of rolling stock with an accuracy of 50 meters and pinpoint the location of a rail break with an accuracy of 100 meters. These results can be used in the development of rolling stock tracking systems, including high-speed vehicles, as well as in diagnostic systems for rail network components, which will ultimately enable the transition to predictive failure detection systems.

**Keywords:** track circuit, track section, location of a railway rolling stock, complex input impedance, modeling.



Системы отслеживания поездов в России играют критически важную роль, учитывая масштаб железнодорожной сети, объем перевозок и стратегическое значение железных дорог для экономики и безопасности страны. Эти системы обеспечивают безопасность движения, оптимизацию маршрутов, контроль грузоперевозок и повышение эффективности работы всей транспортной инфраструктуры.

Использование таких систем помогает увеличить пропускную способность поездов по участку и избежать аварий и катастроф на железной дороге.

В настоящее время использование информации о местонахождении поезда является основой для составления графиков приема и отправления, а также для обслуживания, ремонта устройств и маневровой работы на станциях.

Однако данные системы не меняются довольно длительное время и характеризуются низкой точностью определения местоположения железнодорожного подвижного состава [1].

Кроме рельсовых цепей для точного позиционирования местоположения поездов в настоящее время используют системы спутниковой навигации [2, 3], которые становятся незаменимым инструментом в современной транспортной инфраструктуре, включая железнодорожный транспорт. Точность позиционирования спутников позволяет отслеживать положение подвижного состава практически в режиме реального времени, повышая безопасность движения и эффективность управления перевозочным процессом.

Важно учитывать специфику железнодорожной инфраструктуры. Железнодорожные пути часто проходят через тоннели, лесополосы и зоны плотной застройки, что создает помехи для сигналов GPS и ГЛОНАСС. Дополнительно следует отметить влияние рельефа, который наиболее ощущается в горных районах, где сигналы могут отражаться или ослабевать, вызывая ошибки в определении местоположения. Кроме того, электромагнитные помехи, создаваемые промышленностью, транспортом и коммуникационными сетями, также негативно влияют на работу приемников спутникового сигнала. Некоторые природные явления, такие как солнечная активность и геомагнитные бури, способны существенно снизить точность позиционирования. Спутниковые системы навигации имеют также слабую защиту от внешних воздействий. Достаточно создать один лишний сигнал от ложного спутника, чтобы существенно исказить результат позиционирования [4].

Следует отметить, что при использовании систем спутниковой навигации возникает проблема передачи полученной информации о местоположении с подвижного состава в центр управления. Далеко не вся сеть железных дорог РФ обеспечена системами передачи данных с локомотива по радиоканалу [5].

Поэтому спутниковые системы навигации в обозримом будущем не могут стать основой систем интервального регулирования движения поездов, обеспечивающих безопасность движения. В соответствии с технической политикой компании ОАО «Российские железные дороги» основой обеспечения безопасности движения поездов остаются рельсовые цепи. Дискретность определения местоположения поездов при рельсовых цепях определяется границами рельсовых цепей и при необходимости увеличить дискретность возрастает количество рельсовых цепей, а следовательно, количество аппаратуры.

В качестве дополнения или даже альтернативы классическим рельсовым цепям авторами предлагается использование значения входного сопротивления типовой аппаратуры согласования, нагруженной на участок рельсовой линии для оценки состояния участка пути, в том числе для отслеживания местоположения железнодорожного подвижного состава.

Суть предложения – в отслеживании изменения входного сопротивления ( $Z_{вх}$ ) при свободном состоянии путевого участка, при вступлении подвижного состава и его проследовании по участку, а также при нарушении целостности рельсовой нити.

Целью работы является оценка возможности использования значения комплексного входного сопротивления участка железнодорожного пути для уточнения местоположения железнодорожного подвижного состава в классических рельсовых цепях.

Проанализируем, как изменяются диапазоны значений активной и реактивной составляю-

щих входного сопротивления для традиционной схемы рельсовой цепи (РЦ), где контроль изменения входного сопротивления может выступать в качестве дополнительной функции для повышения точности определения состояния путевого участка.

Метод контроля состояния путевого участка с помощью мониторинга входного сопротивления может быть применим к различным типам рельсовых цепей. На основе универсальной имитационной модели рассмотрим конкретный случай для оценки эффективности метода на примере перегонной кодовой рельсовой цепи с частотой сигнального тока 25 Гц, которая представлена на рисунке 1.

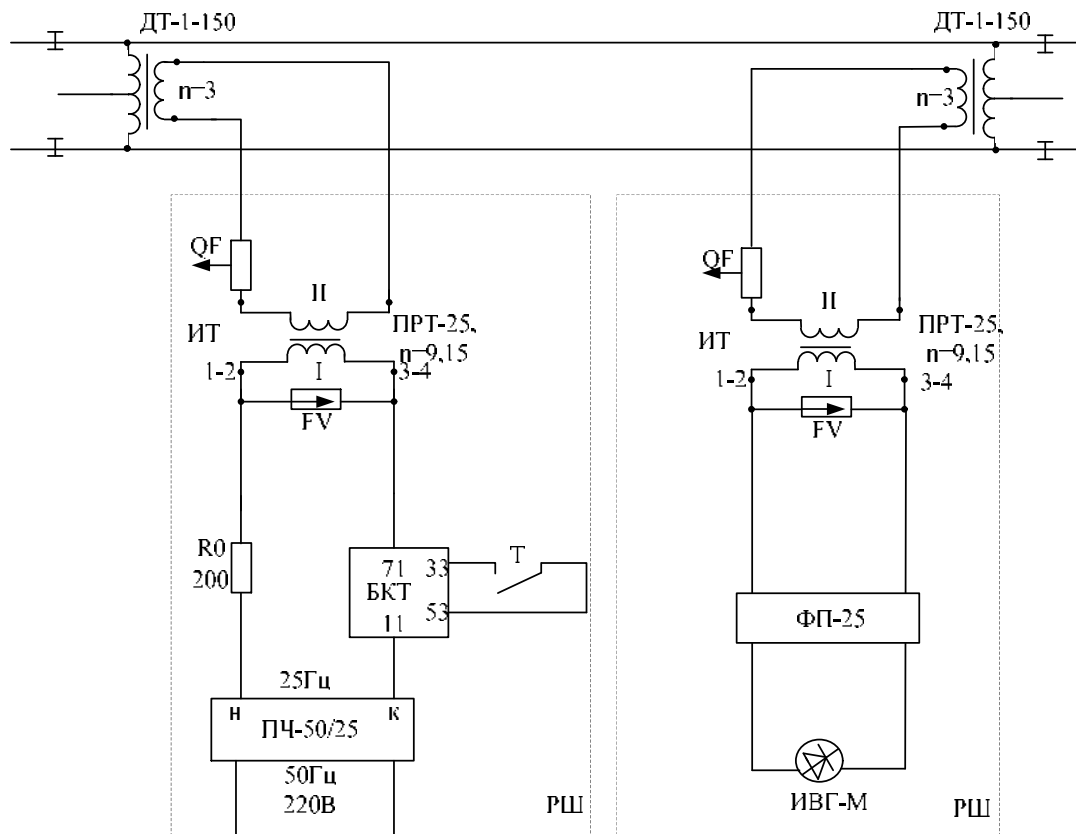


Рисунок 1 – Схема перегонной кодовой РЦ 25 Гц

Питание РЦ осуществляется от высоковольтной линии переменного тока частотой 50 Гц, а сигнальный ток частотой 25 Гц получается на выходе статического преобразователя частоты ПЧ 50/25-100. В таком случае типовая аппаратура, применяемая на питающем конце, содержит следующие элементы: ограничительный резистор, изолирующий трансформатор и дроссель-трансформатор.

К аппаратуре, применяемой на релейном конце РЦ, относятся дроссель-трансформатор, изолирующий трансформатор, путевой фильтр и путевой приемник (на примере реле ИВГ-М).

Все выражения и графики, представленные в данной работе с целью проанализировать поведение входного сопротивления при различных значениях влияющих параметров, чтобы получить эффективный метод контроля состояния путевого участка, были реализованы с помощью Smath Studio – российского программного обеспечения для выполнения инженерных расчетов [6].

Схема замещения кодовой РЦ 25 Гц представлена на рисунке 2.

Матрицы типовых элементов для моделирования взяты из справочника [7]:

– коэффициенты матрицы ограничивающего резистора:

$$\begin{bmatrix} 1 & 200 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

– коэффициенты четырехполосника изолирующего трансформатора ИТП типа ПРТ-А:

$$\text{ИТП} = \begin{bmatrix} 9,15 & 2,4e^{j36^\circ} \\ 0,006e^{-j65^\circ} & 0,11 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

– коэффициенты четырехполосника дроссель-трансформатора ДТП типа ДТ 1-150:

$$\text{ДТП} = \begin{bmatrix} 3 & 0,05e^{j35^\circ} \\ 0,302e^{-j60^\circ} & 0,333 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

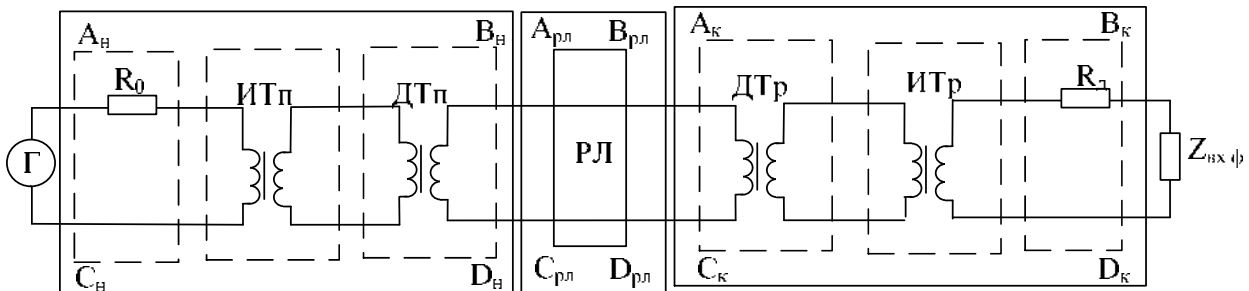


Рисунок 2 – Схема замещения кодовой РЦ 25 Гц

Четырехполосник питающего конца получается в результате перемножения матриц:

$$[A_n] = \begin{bmatrix} 1 & R_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \text{ИТП} \cdot \text{ДТП}; \quad (4)$$

$$[A_n] = \begin{bmatrix} 1 & 200 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 9,15 & 2,4e^{j36^\circ} \\ 0,006e^{-j65^\circ} & 0,11 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 3 & 0,05e^{j35^\circ} \\ 0,302e^{-j60^\circ} & 0,333 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Коэффициенты четырехполосника питающего конца в результате перемножения:

$$A_n = 34,81e^{-j15,78^\circ}; \quad B_n = 8,428e^{j4,78^\circ}; \quad C_n = 0,051e^{-j61,93^\circ}; \quad D_n = 0,037e^{-j0,23^\circ}.$$

Коэффициенты четырехполосника дроссель-трансформатора ДТр типа ДТ 1-150:

$$\text{ДТр} = \begin{bmatrix} 0,333 & 0,525e^{j40^\circ} \\ 0,49e^{-j70^\circ} & 3 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

коэффициенты четырехполосника изолирующего трансформатора ИТр типа ПРТ-А:

$$\text{ИТр} = \begin{bmatrix} 0,11 & 2,4e^{j36^\circ} \\ 0,006e^{-j65^\circ} & 9,15 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Четырехполосник релейного конца получается в результате перемножения матриц:

$$[A_k] = D_{Tp} \cdot И_{Tp} \cdot \begin{bmatrix} 1 & R_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$[A_k] = \begin{bmatrix} 0,333 & 0,525e^{j40^\circ} \\ 0,49e^{-j70^\circ} & 3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,11 & 2,4e^{j36^\circ} \\ 0,006e^{-j65^\circ} & 9,15 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & R_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Коэффициенты четырехполюсника релейного конца в результате перемножения:

$$A_k = 0,037e^{-j0,21^\circ}; \quad B_k = 8,432e^{j5,12^\circ}; \quad C_k = 0,072e^{-j68,79^\circ}; \quad D_k = 36,45e^{-j22,67^\circ}.$$

Вторичными параметрами двухпроводной рельсовой линии (РЛ) являются волновое сопротивление  $Z_B$  и коэффициент распространения  $\gamma$ , вычисляемые через первичные параметры:  $R_{и}$  – сопротивление изоляции рельсовой линии, которое зависит от состояния балласта;  $Z_p$  – удельное сопротивление рельсов, которое в свою очередь зависит от частоты сигнального тока [7]:

$$Z_B = \sqrt{Z_p \cdot R_{и}}; \quad (10)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{Z_p}{R_{и}}}. \quad (11)$$

Коэффициенты четырехполюсника РЛ в нормальном режиме:

$$A_{РЛ} = D_{РЛ} = \text{ch}(\gamma l); \quad (12)$$

$$B_{РЛ} = Z_B \cdot \text{sh}(\gamma l); \quad (13)$$

$$C_{РЛ} = \frac{1}{Z_B} \cdot \text{sh}(\gamma l). \quad (14)$$

Коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии  $[РЛ_{l-x}]$  длиной  $(l-x)$  км от начала до места нахождения шунта  $x$ :

$$[РЛ_{l-x}] = \begin{bmatrix} \text{ch}((l-x) \cdot \gamma) & Z_B \cdot \text{sh}((l-x) \cdot \gamma) \\ \frac{1}{Z_B} \cdot \text{sh}((l-x) \cdot \gamma) & \text{ch}((l-x) \cdot \gamma) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Коэффициенты четырехполюсника шунта (колесных пар)  $[РЛ_{Rш}]$ :

$$[РЛ_{Rш}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_{ш}} & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Коэффициенты четырехполосника рельсовой линии  $[P_{Lx}]$  длиной  $(x)$  км от места нахождения шунта  $x$  до конца рельсовой линии:

$$[P_{Lx}] = \begin{bmatrix} \operatorname{ch}(x \cdot \gamma) & Z_B \cdot \operatorname{sh}(x \cdot \gamma) \\ \frac{1}{Z_B} \cdot \operatorname{sh}(x \cdot \gamma) & \operatorname{ch}(x \cdot \gamma) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Поскольку в данном режиме дополнительное влияние на параметры РЛ оказывает шунт с сопротивлением  $R_{ш}$ , то обобщенный четырехполосник  $P_{Lш}$  определяется перемножением матриц [8]:

$$[P_{Lш}] = [P_{L_{l-x}}] \cdot [P_{LRш}] \cdot [P_{Lx}]. \quad (18)$$

Для отображения поведения входного сопротивления в разных режимах необходимо задать значения параметров, влияющих на функционирование рельсовой линии:

нормативное удельное сопротивление рельсов при частоте сигнального тока 25 Гц и медных приварных соединителях:  $Z_p = 0,5e^{j52^\circ}$ ;

диапазон изменения удельного сопротивления изоляции двухниточной рельсовой линии, начиная от нормативного минимального значения:  $R_{и} = 1 - 3 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ ;

нормативное значение сопротивления между смежными рельсами изолирующего стыка в процессе эксплуатации должно быть не менее 50 Ом, примем данное значение как сопротивление полного обрыва. Для моделирования неполного обрыва примем значение  $R_o = 1 \text{ Ом}$ ;

за сопротивления поездного шунта примем нормативное значение  $R_{ш} = 0,06 \text{ Ом}$ ;

входное сопротивление фильтра ФП-25, нагруженного путевым реле типа ИВГ-М, численно равно 200 Ом.

При моделировании для предлагаемого метода проанализируем, как изменятся активная и реактивная составляющие входного сопротивления в нормальном, шунтовом и контрольном режимах при разной длине путевого участка ( $l$ ), начиная от минимально допустимой длины блок-участка (1000 м) и заканчивая принятой максимальной длиной для выбранного типа рельсовой цепи (2500 м).

На основании расчетных формул получаем значения активной и реактивной составляющих входного сопротивления в нормальном режиме при разных значениях сопротивления изоляции ( $R_{и}$ ). На рисунке 3 представлены результаты изменения  $\operatorname{Im}(Z_{вх})$  и  $\operatorname{Re}(Z_{вх})$  для  $l = 1000 \text{ м}$ .

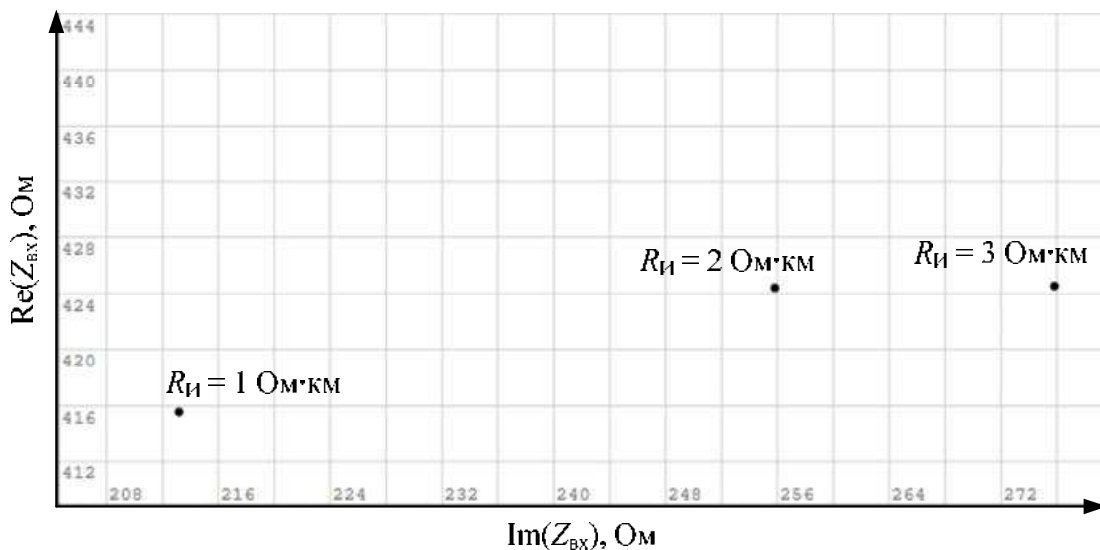


Рисунок 3 – Изменение активной и реактивной составляющих входного сопротивления в нормальном режиме ( $l = 1000 \text{ м}$ )

Рисунок 3 демонстрирует прямую зависимость между сопротивлением изоляции и активной/реактивной составляющими входного сопротивления: увеличение сопротивления изоляции приводит к их росту. Поскольку сопротивление изоляции является важным параметром, влияющим на значение  $Z_{вх}$  во всех режимах работы, и его снижение указывает на возможные проблемы, такие как загрязнение балласта песком или перевозимым углем, что может привести к нарушению нормального действия рельсовой линии, то на основе данной зависимости можно установить пороги для предупреждающей диагностики.

Для анализа динамики изменения  $\text{Im}(Z_{вх})$  и  $\text{Re}(Z_{вх})$  в шунтовом режиме при разных значениях сопротивления изоляции на рисунке 4 представлены результаты моделирования для  $l = 1000$  м, где в виде сплошных линий отображено изменение  $Z_{вх}$  по всей длине путевого участка, точками отмечены места контроля нахождения шунта, отсчет места нахождения шунта начинается с релейного конца, за последнюю координату места нахождения шунта принят питающий конец ( $X_{ш} = 1000$  м). Для наглядности того, как отличаются диапазоны изменений  $\text{Im}(Z_{вх})$  и  $\text{Re}(Z_{вх})$  в двух рассмотренных режимах при разных значениях сопротивления изоляции на рисунке 3 показано также изменение входного сопротивления в нормальном режиме.

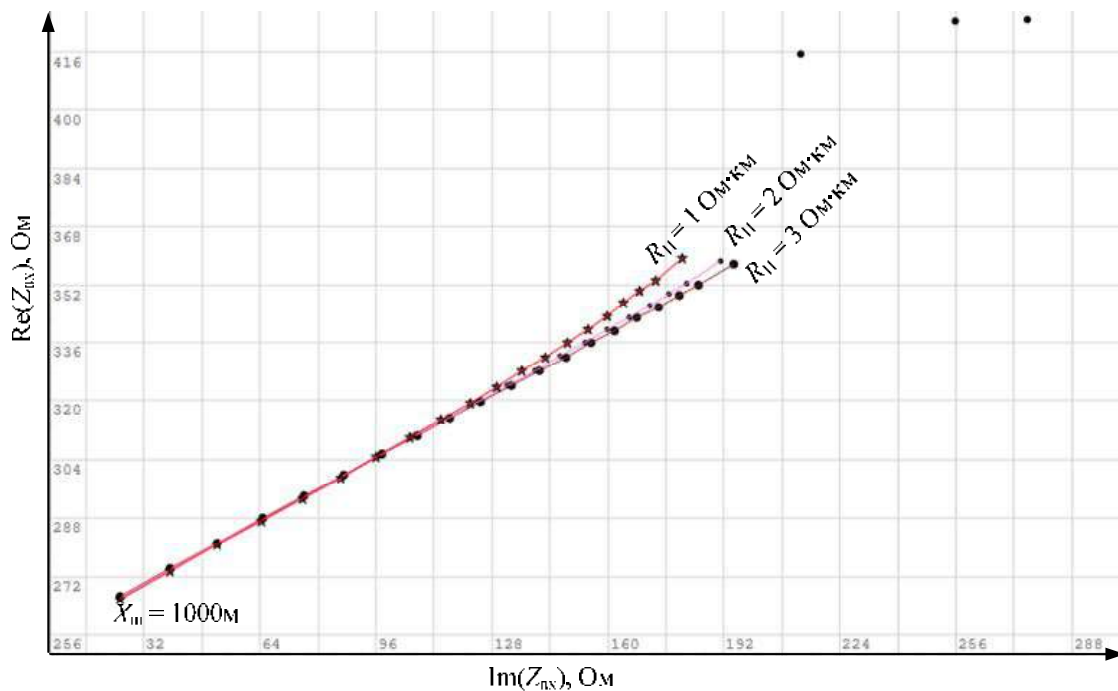


Рисунок 4 – Изменение активной и реактивной составляющих входного сопротивления в нормальном и шунтовом режимах ( $l = 1000$  м)

В рамках заключительной части анализа влияния минимально допустимой длины блок-участка  $l = 1000$  м на входное сопротивление рассмотрим, как различаются диапазоны  $\text{Im}(Z_{вх})$  и  $\text{Re}(Z_{вх})$  в контрольном режиме. Подставив все исходные данные в формулы расчета входного сопротивления из источника [7], получаем результаты изменения активной и реактивной составляющих входного сопротивления для контрольного режима при разных значениях сопротивления изоляции. На рисунке 5 представлены результаты моделирования, где в виде сплошных линий отображено изменение  $Z_{вх}$  по всей длине путевого участка, точками на сплошных линиях отмечены места контроля нахождения обрыва, отсчет места нахождения обрыва начинается с релейного конца, за последнюю координату места нахождения обрыва принят питающий конец ( $X_0 = 1000$  м), значения  $Z_{вх}$  при неполном обрыве обозначены знаком «☆». С целью сравнения диапазонов  $\text{Im}(Z_{вх})$  и  $\text{Re}(Z_{вх})$  в контрольном режиме со значениями в

нормальном режиме изменение значений входного сопротивления в нормальном режиме при различных значениях сопротивления изоляции показано в виде точек.

Анализ данных на рисунке 5 позволяет установить следующее:

значения входного сопротивления в случае частичного и полного обрыва существенно различаются между собой и лежат выше относительно значений в нормальном режиме;

значения входного сопротивления при частичном обрыве для различного сопротивления изоляции четко различимы, в то время как при полном обрыве наблюдается пересечение значений.

В рамках дальнейшего моделирования рассмотрим поведение входного сопротивления в трех режимах работы рельсовой цепи при увеличении длины путевого участка. На рисунке 6 представлены диапазоны изменения  $\text{Im}(Z_{\text{вх}})$  и  $\text{Re}(Z_{\text{вх}})$  во всех режимах при различных значениях сопротивления изоляции для максимальной длины, возможной для выбранного типа РЦ ( $l = 2500 \text{ м}$ ).

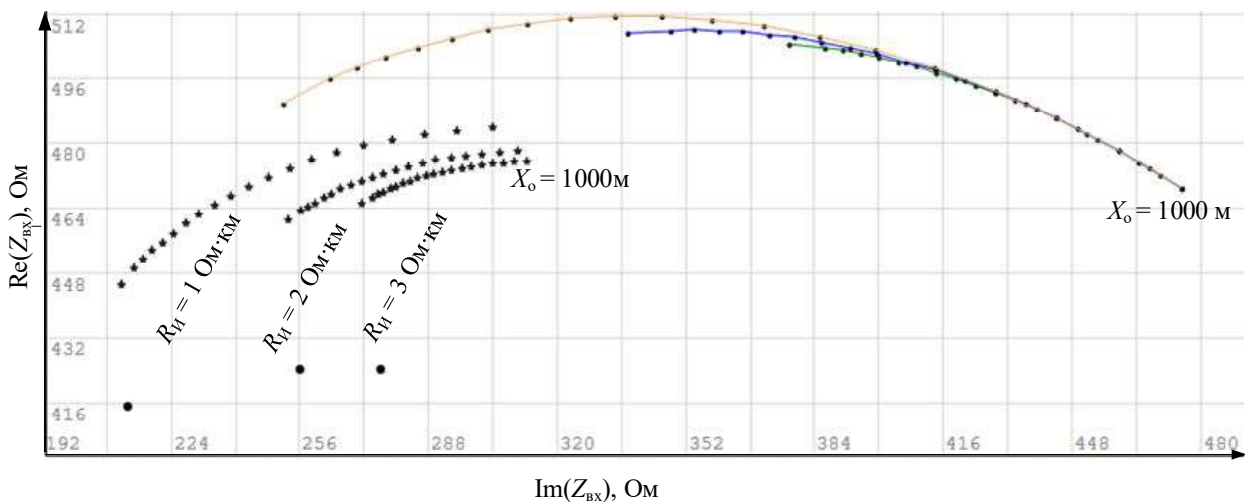


Рисунок 5 – Сравнение диапазонов изменения  $\text{Im}(Z_{\text{вх}})$  и  $\text{Re}(Z_{\text{вх}})$  в контрольном режиме со значениями в нормальном режиме при разных значениях сопротивления изоляции ( $l = 1000 \text{ м}$ )

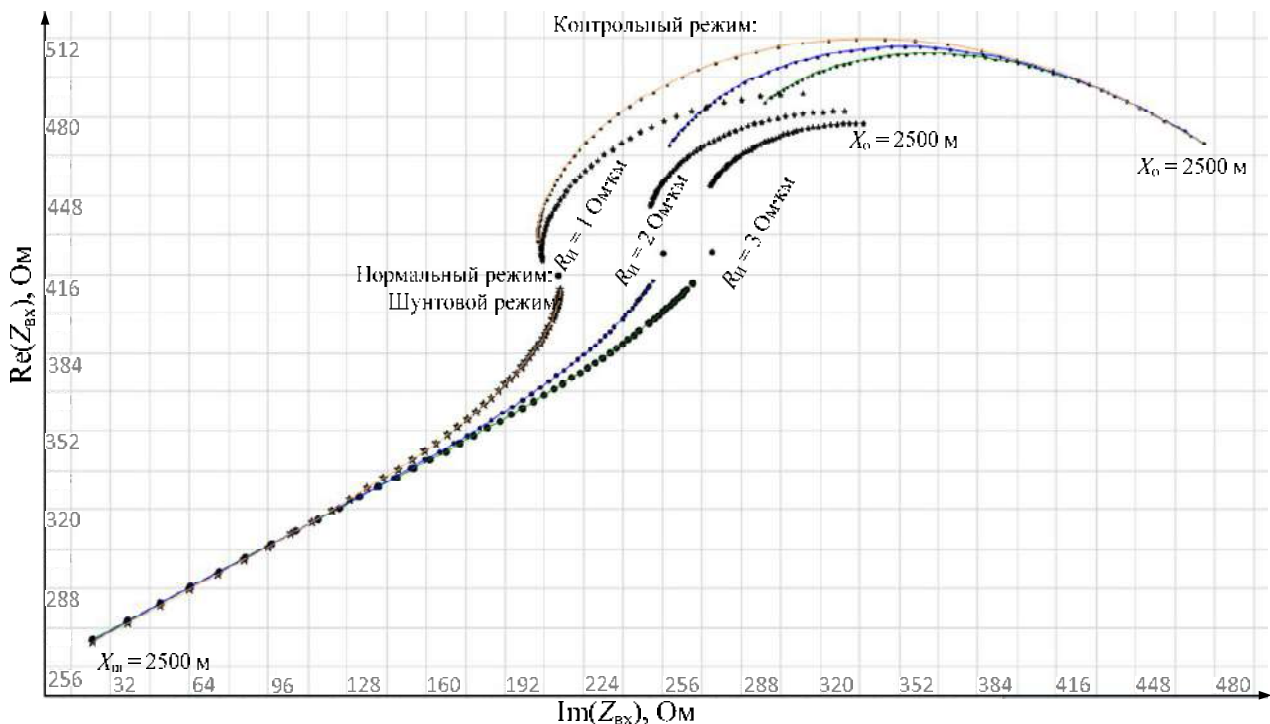


Рисунок 6 – Графики изменения входного сопротивления во всех режимах ( $l = 2500 \text{ м}$ )

Для того чтобы провести комплексный сравнительный анализ влияния длины путевого участка на активную и реактивную составляющие входного сопротивления, представим данные на рисунке 7 во всех режимах при различных значениях сопротивления изоляции для  $l = 1000$  м.

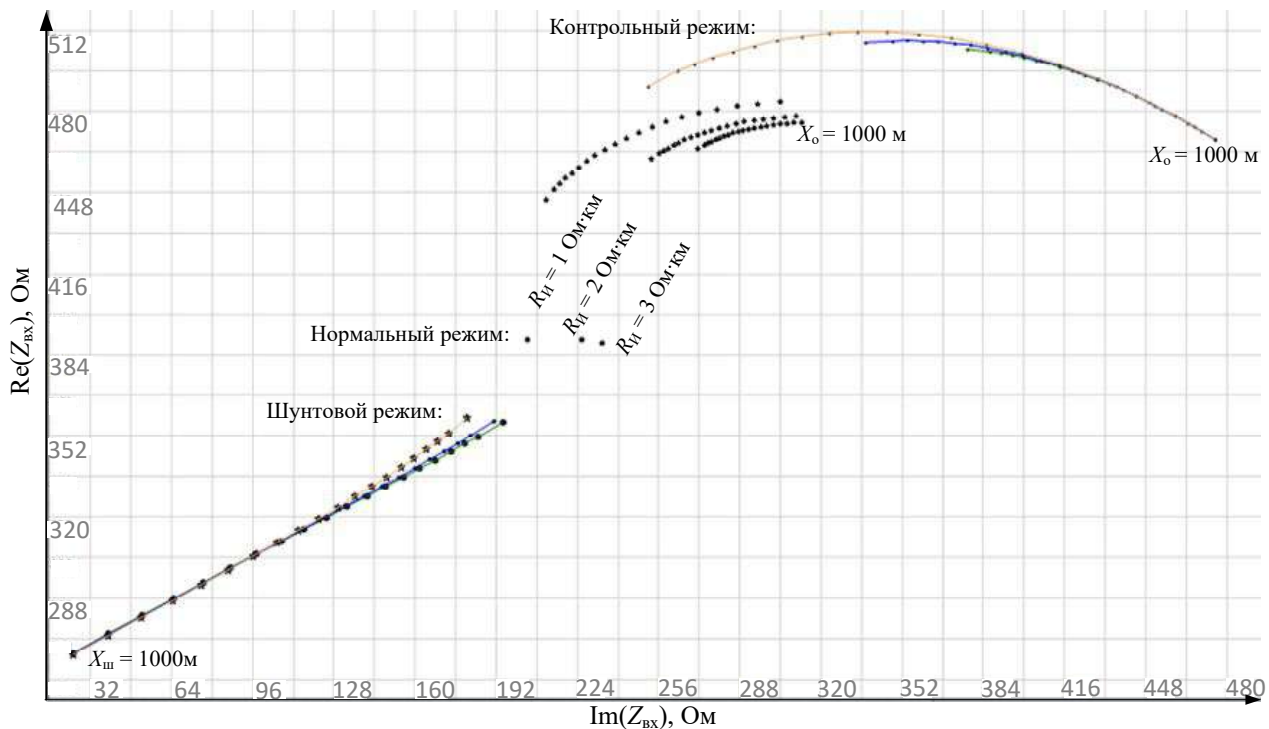


Рисунок 7 – Графики изменения входного сопротивления во всех режимах ( $l = 1000$  м)

Общие закономерности, выявленные при моделировании с разной длиной путевого участка и фиксированном значении нагрузки:

чем больше длина путевого участка, тем ближе друг к другу диапазоны значений входного сопротивления в разных режимах;

увеличение длины путевого участка приводит к тому, что значения  $Im(Z_{вх})$  и  $Re(Z_{вх})$  при неполном обрыве частично попадают в диапазон значений при полном обрыве;

для участка большой протяженности (2500 м) при выбранном шаге дискретизации различия между значениями в выбранных точках контроля незначительны (порядка сотых долей Ом), в то время как на коротком участке (1000 м) сохраняется возможность определения как местоположения подвижного состава, так и повреждений линии с заданной точностью.

Полученные при моделировании результаты соответствуют классической теории работы рельсовых цепей [7, 8].

На основании изложенного можно сделать следующие выводы. Рассмотренный метод использования значения входного сопротивления типовой аппаратуры согласования, нагруженной на участок рельсовой линии для оценки состояния участка пути, способен устранить ряд недостатков, присущих традиционным рельсовым цепям. В частности, решает проблему низкой информативности, переходя к более детальной диагностике, что достигается за счет способности различать значения входного сопротивления в разных режимах РЦ и тем самым позволяя определять причину занятости участка: связано ли это с переходом в состояние защитного отказа в случае нарушения целостности рельсов или с движущимся составом. Кроме того, такая система диагностики состояния путевого участка способна контролировать местоположение подвижного состава и обрыва на участке с выбранной точностью. Для коротких участков (1000 м) достижима точность 50 м с возможностью уменьшения при необходимости, в то время как для протяженных участков (2500 м) оптимизация шага измерений до 100 м и более сохраняет функциональность системы.



Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что даже с применением текущей аппаратуры РЦ потенциально возможно обеспечить точность определения координаты подвижного состава или обрыва рельсовой нити, равную 50 м, для длины РЦ, равной 1000 м, и точность 100 м – для длины рельсовой цепи, равной 2500 м.

Поскольку такой метод контроля состояния путевого участка не требует замены существующей аппаратуры РЦ и лишь дополняет ее измерительными устройствами, его внедрение не нарушает работу действующих систем, таких как автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС) или автоблокировка, что упрощает процесс интеграции [8, 9].

Независимо от длины участка на интервале от середины контролируемого участка до питающего конца РЦ наблюдается тенденция сближения значений входного сопротивления при разных значениях сопротивления изоляции в момент нахождения подвижного состава на участке. Это явление может быть предметом дальнейших исследований с целью достижения результатов, аналогичных тем, которые прослеживаются при свободном состоянии участка, когда, наблюдая за снижением входного сопротивления, можно делать вывод об ухудшении сопротивления изоляции.

Учитывая перечисленные выше факторы, логичным шагом является исследование возможности работы системы диагностики при уходе от традиционной аппаратуры рельсовых цепей.

### Список литературы

1. Railway Signalling and Interlocking: International Compendium. 3ed ed. Eds.: Dr. G. Theeg, Dr. S. Vlasenko. Germany, PMC Media House GmbH, 2020, 560 p. ISBN 978-3-96245-169-1.
2. Бородин, А. В. Обзор технологий идентификации и позиционирования железнодорожного подвижного состава / А. В. Бородин. – Текст : непосредственный // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2023. – № 2 (62). – С. 49–55. – EDN GJRHZO.
3. Рябов, И. В. Повышение точности позиционирования подвижных объектов с помощью сигналов глобальных навигационных спутниковых систем / И. В. Рябов, А. Е. Макаров. – Текст : непосредственный // Радиотехника. – 2020. – Т. 84. – № 9 (17). – С. 49–57. – DOI 10.18127/j00338486-202009(17)-04. – EDN GRKQFU.
4. Елизаров, Д. А. Спутниковые системы позиционирования на железнодорожном транспорте: риски и угрозы / Д. А. Елизаров, М. М. Соколов, А. И. Давыдов. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 12. – С. 25–27. – DOI: 10.62994/АТ.2025.12.12.004.
5. Клепач, А. П. Инерциальные навигационные системы / А. П. Клепач, А. В. Проскуряков, С. А. Клепач. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 9. – С. 10–12.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025668393 Российская Федерация. Программа расчета входного сопротивления рельсовой цепи : заявлено 09.06.2025 : опубликовано 15.07.2025 / М. М. Соколов, К. В. Петракова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения». – EDN NZEJUC.
7. Тарасов, Е. М. Математическое моделирование рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий / Е. М. Тарасов. – Самара : Самарская гос. акад. путей сообщения, 2003. – 117 с. – EDN QNQYBJ.
8. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / под ред. В. С. Аркатова. – Москва : ООО «Миссия-М», 2006. – 496 с. – EDN QNTYWP.
9. Sokolov, M., & Khodkevich, A. (2025, March). On Modeling a Section of Railway Track for the Purpose of Analyzing Changes in the Value of Input Impedance. In *2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)* (pp. 450–454). IEEE, <https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon65166.2025.10986123>.
10. Sokolov, M., & Khodkevich, A. (2025, May). Application of Conformal Mappings to Determine the Location of Rolling Stock on a Section of a Rail-Wire Line. In *2025 International*

## References

1. Railway Signalling and Interlocking: International Compendium. 3ed ed. Eds.: Dr. G. Theeg, Dr. S. Vlasenko. Germany, PMC Media House GmbH, 2020, 560 p. ISBN 978-3-96245-169-1.
2. Borodkin A. Overview of technologies for identification and positioning of railway rolling stock. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznikh dorog – Railway equipment*, 2023, no. 2(62), pp. 49-55. EDN GJRHZO. (In Russian).
3. Ryabov I.V., Makarov A.E. Improvement of the positioning accuracy of moving objects using signals of global navigation satellite systems. *Radiotekhnika – Radio engineering*, 2020, vol. 84, no. 9(17), pp. 49-57. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202009\(17\)-04](https://doi.org/10.18127/j00338486-202009(17)-04). EDN GRKQFU. (In Russian).
4. Elizarov D.A., Sokolov M.M., Davydov A.I. Satellite positioning systems in railway transport: risks and threats. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2025, no. 12, pp. 25-27. <https://doi.org/10.62994/AT.2025.12.12.004>. (In Russian).
5. Klepach A.P., Proskuriakov A.V., Klepach S.A. Inertial navigation systems. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2009, no. 9, pp. 10-12. (In Russian).
6. Sokolov M.M., Petrakova K.V. *Certificate of state registration of computer program RU 2025668393*, 15.07.2025. EDN NZEJUC.
7. Tarasov E.M. *Matematicheskoe modelirovanie rel'sovykh tsepeĭ s raspredelennymi parametrami rel'sovykh liniĭ* [Mathematical modeling of track circuits with distributed parameters of rail lines]. Samara, Samara State Academy of Railways Publ., 2003, 117 p. EDN QNQYBJ. (In Russian).
8. Arkatov V.S. ed. *Rel'sovye cepi magistral'nykh zheleznikh dorog* [Track circuits of mainline railways]. Moscow, LLC "Mission-M" Publ., 2006, 496 p. EDN QNTYWP. (In Russian).
9. Sokolov, M., & Khodkevich, A. (2025, March). On Modeling a Section of Railway Track for the Purpose of Analyzing Changes in the Value of Input Impedance. In *2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)* (pp. 450–454). IEEE, <https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon65166.2025.10986123>.
10. Sokolov, M., & Khodkevich, A. (2025, May). Application of Conformal Mappings to Determine the Location of Rolling Stock on a Section of a Rail-Wire Line. In *2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* (pp. 935-939). IEEE, <https://doi.org/10.1109/ICIEAM65163.2025.11028456>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Соколов Максим Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

### Ходкевич Антон Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: ait-omgups@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Sokolov Maxim Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department "Railway Signaling and Interlocking", OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

### Khodkevich Anton Gennad'evich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, head of the department "Railway Signaling and Interlocking", OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: ait-omgups@mail.ru

## Петракова Ксения Владиславовна

Барабинская дистанция сигнализации, централизации и блокировки – структурное подразделение Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Песчаная ул., д. 1, Новосибирская область, г. Барабинск, 632334, Российская Федерация.

Ведущий инженер по эксплуатации технических средств.

Тел.: +7 (383) 617-21-32.

E-mail: kseny\_20d@mail.ru

## Petrakova Ksenija Vladislavovna

Barabinsk signaling, centralization and blocking distance – a structural subdivision of the West Siberian Infrastructure Directorate – a structural subdivision of the West Siberian Railway – a branch of JSC Russian Railways.

1, Peschanaya st., Novosibirsk region, Barabinsk, 632334, the Russian Federation.

Leading engineer for operation of technical equipment.

Phone: +7 (383) 617-21-32.

E-mail: kseny\_20d@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Соколов, М. М. Оценка изменения входного сопротивления рельсовой цепи при движении железнодорожного подвижного состава / М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич, К. В. Петракова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – №3 (63). – С. 79 – 90.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sokolov M.M., Khodkevich A.G., Petrakova K.V. Assessment of the changes in the input resistance of the rail circuit during the movement of railway rolling stock. Journal of Transsib Railway Studies, 2025, no. 3 (63), pp. 79-90. (In Russian).

УДК 656.21.001.2

**Ж. С. Баротов, М. С. Ташматова**

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

## МЕРОПРИЯТИЯ ПО УСКОРЕНИЮ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ В ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

**Аннотация.** Стремительная глобализация и растущие объемы перевозок требуют внедрения современных технологий и инновационных решений. В связи с этим необходимо эффективно планировать перевозку грузов различными видами транспорта. Перевозки грузов обуславливаются необходимостью продолжения и завершения процесса производства продуктов промышленности и сельского хозяйства в сфере обращения, после чего они становятся готовыми к потреблению. Предлагаемая методология по совершенствованию доставки грузов обеспечит расчет всех видов отправок и позволит сократить время доставки грузов. Применение предлагаемой методологии поможет определить процесс принятия решения при выполнении различных процессов на станции. Предложенная модель основана на математическом моделировании в зависимости от технологического процесса для принятия эффективного решения. В целях проверки методологии по нормированию продолжительности перевозок необходимо организовать их, учитывая опаздывание каждого технологического процесса. Основными причинами применения нормативов являются ускорение доставки груза и правильное распределение штрафов между железной дорогой и клиентами за несвоевременную доставку. Эффективное управление грузопотоками на железнодорожном транспорте требует комплексного подхода, направленного на улучшение всех аспектов функционирования, что в свою очередь будет способствовать повышению грузооборота и развитию транспортной системы. Эффект от применения данной методики позволяет планировать принятие решений при изучении факторов, влияющих на ожидание выполняемых технологических процессов для совершенствования доставки грузов. Модель позволяет сократить время ожидания вагонов и наблюдать технологические процессы.

**Ключевые слова:** доставка, поезд, станция, технология, операция, маршрутная отправка.

**Jamshid S. Barotov, Mukaddas S. Tashmatova**

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

## MEASURES TO ACCELERATE CARGO DELIVERY IN THE LOGISTICS CHAIN

**Abstract.** Rapid globalization and growing transportation volumes require the implementation of modern technologies and innovative solutions. Therefore, it is essential to effectively plan cargo transportation using various modes of transport. Freight transportation involves moving cargo from the point of production to the point of consumption. Objective: Freight transportation is driven by the need to continue and complete the production of industrial

and agricultural products in circulation, after which they become ready for consumption. The proposed methodology for improving cargo delivery will ensure the calculation of all types of shipments, and will also reduce cargo delivery time. Method: The application of this methodology will help define the decision-making process for various plant processes. The proposed model is based on mathematical modeling of process dependencies for effective decision-making. To test the methodology for standardizing transportation times, it is necessary to organize them taking into account the delays of each technological process. The main reason for implementing standards is to expedite cargo delivery and properly distribute penalties between the railway and customers for late delivery. Scope of application of the results: Ultimately, effective freight flow management in rail transport requires a comprehensive approach aimed at improving all aspects of operation, which in turn will contribute to increased freight turnover and the development of the transport system. The effectiveness of this methodology allows for decision planning by studying factors affecting waiting times for ongoing technological processes to improve freight delivery. This model reduces wagon waiting times and allows for monitoring technological processes.

**Keywords:** delivery, train, station, technology, operation, route dispatch.

В настоящее время выполняются научные и практические работы по эффективному планированию доставки груза путем комбинации различных видов транспорта. При доставке груза требуется рассмотреть преимущества различных видов транспорта. Факторы влияющие на сроки доставки груза определены путем анализа ряда научных работ. Из них основными являются следующие:

- гибкость направлений;
- сохранение качества оказания услуг, снижение расходов;
- специализация грузов при смешанных перевозках;
- доставка груза к окончательному пункту железнодорожным или автомобильным транспортом;
- планирование маршрута по видам транспорта;
- обеспечение безопасности при перевозках различных видов груза.

По рисунку 1 можно увидеть качество различных видов транспорта в системе пятиэтапного уровня.

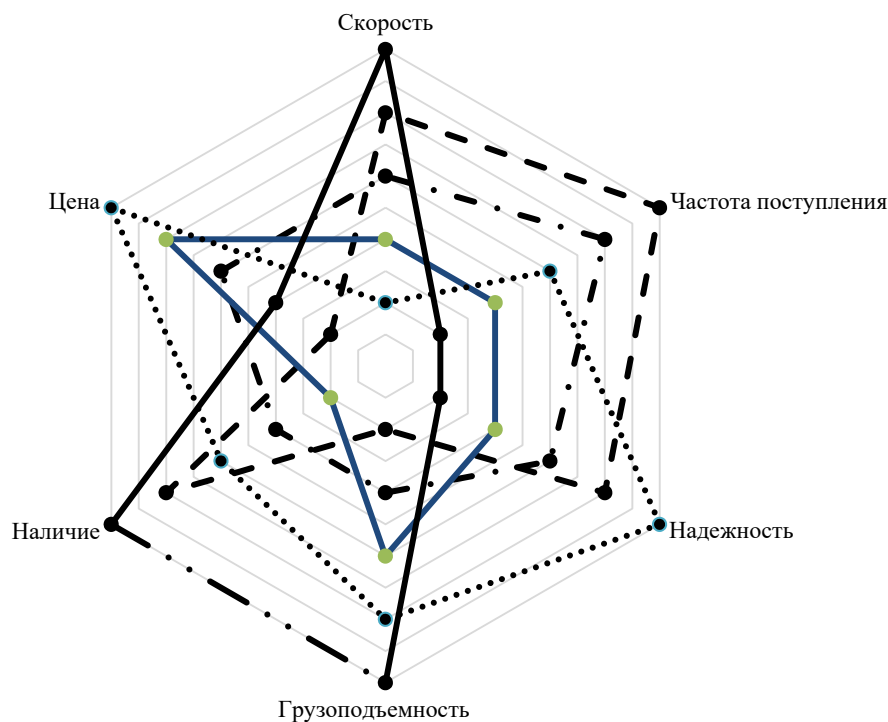


Рисунок 1 – Диаграмма оценки качества различных видов транспорта в системе пятиэтапного уровня:

— · — — железнодорожный транспорт; — · — — водный транспорт; — — — — автомобильный транспорт; — — — — — трубопроводный транспорт; ······ — воздушный транспорт

Анализ показывает, что железнодорожный транспорт в среднем занимает второй уровень, в связи с этим в данной статье предложена методология, которая поможет повысить уровень, частоту отправки и скорость доставки грузов. Это в свою очередь способствует достижению экономической эффективности вследствие доступных цен на перевозки грузов в сравнении с другими видами транспорта [1].

Неравномерный вагонопоток является одной из причин несвоевременной доставки грузов. Целью исследования является разработка отдельных моделей перевозки грузов по видам отправок. Длительные наблюдения продолжительности суточного движения вагонов показывают, что в основном время затрачивается на формирование местного поезда. В таких случаях для устранения проблем формирования вагонов по направлениям требуется комплексный подход для формирования математической методологии. По причине последовательного выполнения операций во времени  $t$  при движении вагона в пути следования процесс движения вагона требуется разделить на композитные части. Для включения движения поездов в график требуется также правильное обеспечение направления движения вагонов.

Многие ученые вели исследовательские работы по совершенствованию доставки грузов железнодорожным транспортом. Среди них Dr. Marin Marinov и Jose Viegas (2011) [2]. Научные работы посвящены организации и управлению движению поездов. Можно увидеть, что для анализа и оценки систем и сети железнодорожного транспорта, а также работы терминалов, проблемы отправления поездов и управления движением на железнодорожном транспорте был использован аналитический метод. Однако данные работы не дали точных решений по нормированию срока доставки грузов на железнодорожном транспорте. Ученый Dr. Hall R. [3] на основе Queueing theory использовал методологию оказания услуг клиентам. На основе данной теории получена возможность управления технологическими процессами, выполняемыми на железнодорожном транспорте.

При организации вагонопотока необходимо выбирать самый оптимальный вариант. При этом требуется определить минимальное расстояние движения поездов по направлению и короткий срок доставки грузов. Однако не следует считать, что короткое расстояние – это минимальное время доставки, так как при дальнем расстоянии из-за сокращения работ по формированию вагонов также сокращается срок доставки грузов [3 – 5].

Рассмотрим два варианта схемы отправления маршрута:

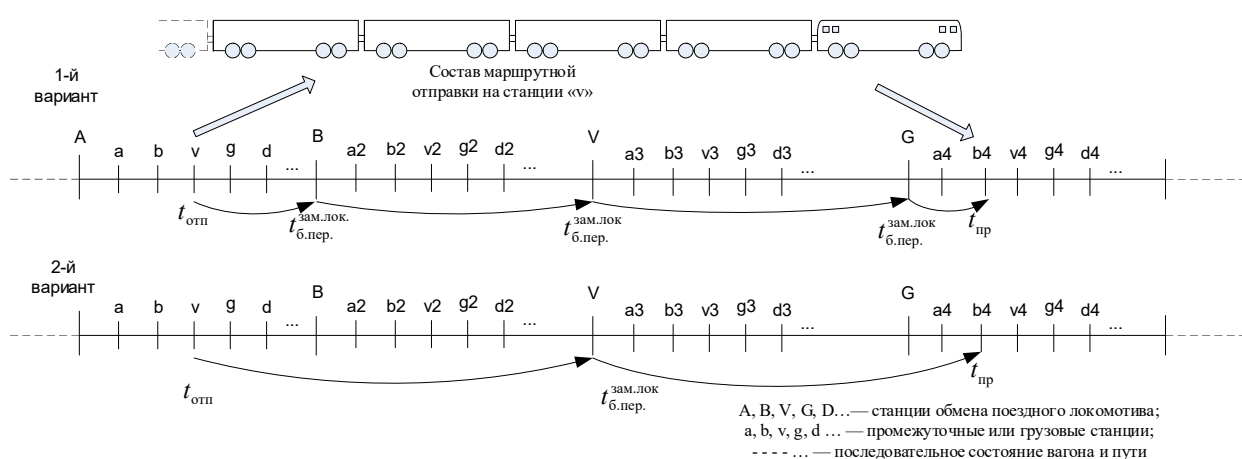


Рисунок 2 – Схема отправления маршрута

В первом варианте отправление вагонов выполняется в составе местного поезда до технической станции «В». На технической станции вагоны не перерабатываются, выполняется смена локомотива и далее вагоны отправляются в соответствии с маршрутными отправлениями. Преимуществами данного варианта являются оптимизация местных перевозок,

минимальное выполнение технологических операций на технических станциях и своевременная доставка грузов.

Во втором варианте также приведена маршрутная отправка вагонов, где состав заранее обеспечивают локомотивом и далее состав передвигается без остановки на технической станции. Смена локомотива, технический и коммерческий осмотр выполняются на следующей технической станции «V». Далее поезд проходит без остановки техническую станцию «G» и выполняет доставку груза в место назначения. Основными преимуществами данного варианта при доставке груза является сокращение процессов технических обработок и своевременная доставка грузов в маршрутах.

Здесь для маршрутной отправки требуется выполнение отдельных операций для каждого участка. При маршрутизации вагонов со станции необходимо определить выполняемые процессы. Время, затрачиваемое в пути следования, состоит из следующих работ: накопление вагонов одного направления при организации технологических процессов станции; организация отправления одного маршрутного поезда со станции  $t_{отп}$ ; затраты на время движения вагонов в пути следования и услуги, оказываемые поездам без переработки  $t_{б.пер.}^{зам.лок.}$ ; затраты на подачу маршрутного поезда на грузовой фронт прибывшего на станцию  $t_{пр}$ . Затраты на технологические процессы обозначим через  $k$  и  $x$ .

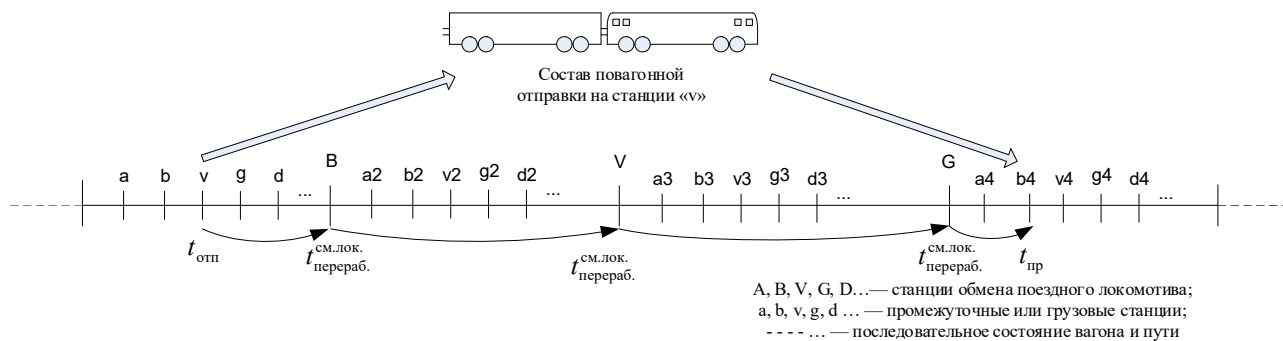


Рисунок 3 – Схема повагонной отправки

При повагонной отправки требуется последовательное выполнение операций в пути следования. Отправление повагонной отправки со станции требует последовательного выполнения процессов в зависимости от выполняемых операций, таких как:

- подача вагонов на путь формирования местных поездов с мест погрузки и выгрузки груза;
- накопление вагонов при формировании местных поездов;
- добавление групповых вагонов в местные поезда;
- переформирование местных или участковых поездов на технических станциях, т. е. сортировка вагонов по направлениям, технический и коммерческий осмотр и смена локомотива;
- доставка груза в местных поездах с технических станций, близких к пункту назначения;
- подача на грузовой фронт вагона, прибывшего на станцию назначения.

При повагонной отправки затрачиваемое время в пути следования состоит из следующих: уборка вагонов с грузовых фронтов и организация местных поездов при организации технологических процессов станции  $t_{отп}$ ; время, затрачиваемое на движение вагона в пути следования и выполнение переработки на каждой технической станции  $t_{перераб.}^{см. лок.}$ ; время, затрачиваемое на подачу на грузовой фронт вагона, прибывшего на станцию назначения  $t_{пр}$ . Затраты на технологические процессы станции обозначим через  $k$  и  $x$  [6].

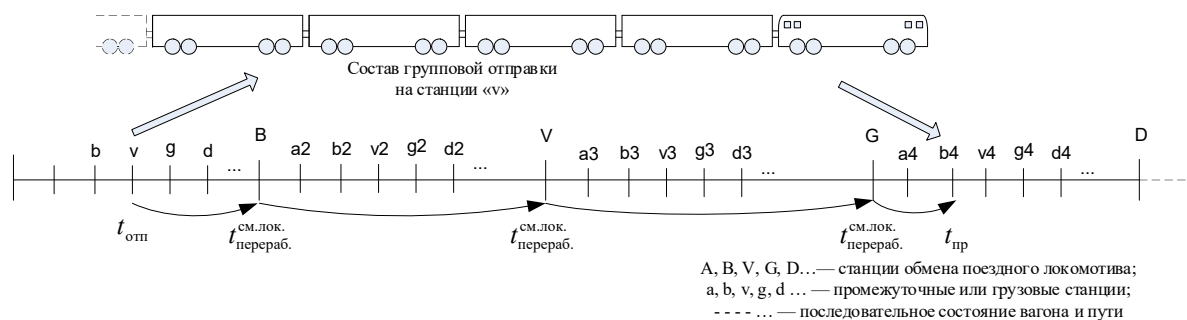


Рисунок 4 – Схема групповой отправки

При групповой отправки требуется последовательное выполнение операций в пути следования. При этом повагонная отправка отличается лишь тем, что два вагона или более отправляются по одной накладной. Это предусматривает предоставление льгот клиентам при оказании услуг.

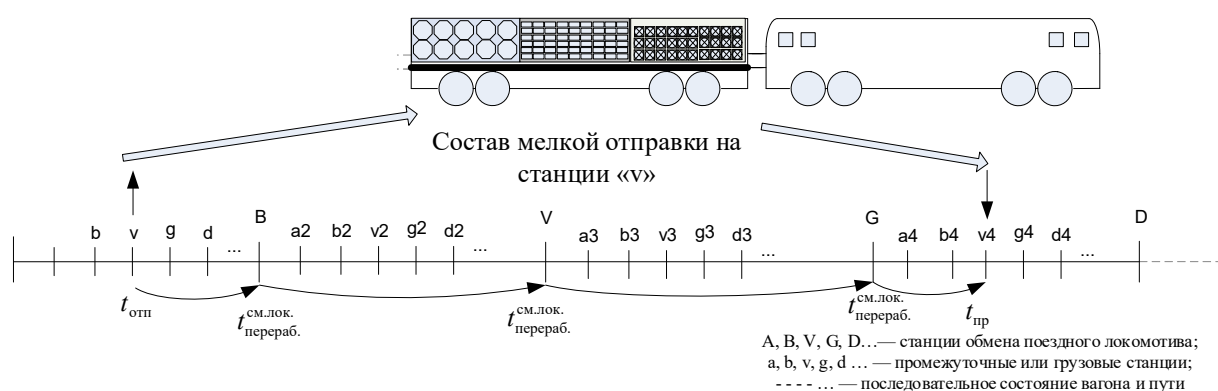


Рисунок 5 – Схема мелкой отправки

Мелкая отправка грузов организуется несколькими отправителями по одной накладной и не требует предоставления отдельного вагона. Мелкая отправка перевозится в крытых вагонах, контейнерах, платформах и полувагонах. По объему груз должен быть меньше половины крытого вагона, больше половины платформы и полувагона. Мелкая отправка в крытом вагоне не должна превышать 1,5 т, в полувагоне – не более 10 т, в крупнотоннажных контейнерах – не более 1,5 т, для среднетоннажных контейнеров – не более 1 т. По длине мелкая отправка должна быть не более 2 м. Технологические операции выполняются на различных местах станции: погрузка грузов на нескольких станциях; погрузка грузов на нескольких грузовых фронтах; оказание услуг клиентам при погрузке грузов на одном грузовом пункте.

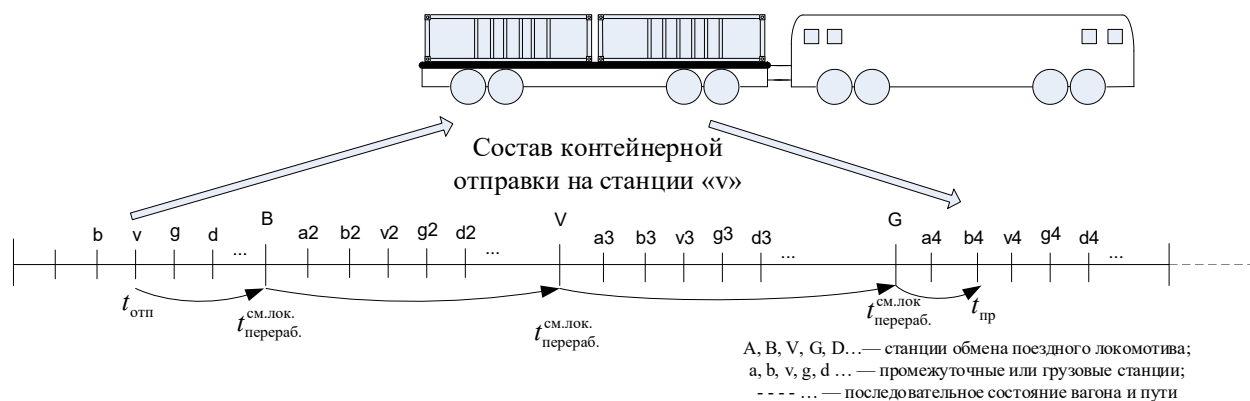


Рисунок 6 – Схема контейнерной отправки

Своеобразие контейнерных перевозок грузов состоит в том, что они позволяют перевозить грузы на различных видах транспорта без перегрузки. В связи с обеспечением сохранности и многофункциональности доставка грузов таким способом является основой мировой логистики. На железнодорожном транспорте доставка контейнеров выполняется при обеспечении гармонизированного технологического процесса от станции отправления до станции назначения. Контейнеры на железнодорожном транспорте перевозятся на платформах, полувагонах и фитинговых платформах. С целью повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта предлагается установить отдельные нормативы по перевозкам контейнеров. Данные нормативы в свою очередь будут определять льготы, оказываемые клиентам [7, 8].

Для определения отдельных нормативов по перевозкам грузов необходимо составить подходящую математическую модель по каждой отправке. Для этого требуется разработать матрицу с применением Queueing theory, учитывая при этом последовательное выполнение технологии. Время на выполнение технологических процессов будет зависеть от вида отправки. Распределение общего времени их ожидания можно рассчитать по формуле [3, 10, 11]:

$$W_q = \frac{1}{(\mu - \lambda)}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – скорость оказания услуг технологического процесса, технол./ч;

$\lambda$  – средняя скорость выполнения технологических процессов, последовательно поступающих в систему, технол./ч

- при  $\mu > \lambda$  время ожидания постоянно уменьшается;
- при  $\mu \approx \lambda$  время ожидания большое;
- при  $\mu \leq \lambda$  в системе будут накапливаться вагоны.

Для вывода вариантов зависимости оптимальных технологических процессов построим матрицу технологий для задачи линейного программирования с элементами выполняемых операций (таблица 1).

Таблица 1 – Матрица выполняемых технологий на линии при доставке грузов

Общая продолжительность времени	Технологические процессы, выполняемые на станции	Станции				Последняя станция
		1-я	2-я	3-я	...	
$\{t_{ij}^{kx}\}$	$t_i^k \backslash t_j^x$	$t_1^x$	$t_2^x$	$t_3^x$	$t_{...}^x$	$t_j^x$
	$t_1^k$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{...}$	$a_{1j}$
	$t_2^k$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{...}$	$a_{2j}$
	$t_3^k$	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	$a_{...}$	$a_{3j}$
	$t_{...}^k$	$a_{...1}$	$a_{...2}$	$a_{...3}$	$a_{...}$	$a_{...j}$
	$t_i^k$	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{...}$	$a_{ij}$

При вводе переменных  $a_{ij}^{kx}$  принимаемые значения будут равны 1. На каждой рассматриваемой станции технологический процесс  $a_i^k$  соответственно выполняемому технологическому процессу будет приниматься как  $a_j^x$ . Если есть зависимость выполняемых операций на станции  $k$  и  $x$  принимаем 1, если зависимости нет, то принимаем 0. Здесь  $i$  и  $j$  – порядок выполнения технологических процессов на станции [9, 10].

Суть поставленных ограничений переменных  $a_{ij}^{kx}$  состоит в том, что в процессе доставки груза на станциях выбирается только одна из выполняемых технологических операций. Все остальные операции будут считаться невыполненными, соответственно они будут равны 0.

Если доставка груза связана с одной отправкой, будут поставлены ограничения переменным  $a_{ij}^{kx}$  :



$$\sum_{j=1}^N a_{ij}^{kx} = 1; \quad (2)$$

$$i = 1, N. \quad (3)$$

- Для выбранной операции  $a_{ij}^{kx} = 1$ ;
- для невыбранной операции  $a_{ij}^{kx} = 0$ .

Соответственно

$$\sum_{i=1}^N a_{ij}^{kx} = 1; \quad (4)$$

$$j = 1, N. \quad (5)$$

где  $N$  – технологические процессы на станции и количество выполнения времени движения на участке;

Данные ограничения обеспечивают выбор единого технологического пути из всех альтернативных операций в процессе доставки груза, т. е. на каждом этапе модель выбирает одну технологическую операцию, а другие будут равняться 0:

$$\sum_i^N t_i^k = \begin{cases} \text{если } a_{11} = 1, \text{ то } a_{21} = 0, a_{31} = 0, \dots, a_{i1} = 0; \\ \text{если } a_{21} = 1, \text{ то } a_{11} = 0, a_{31} = 0, \dots, a_{i1} = 0; \\ \text{если } a_{31} = 1, \text{ то } a_{11} = 0, a_{21} = 0, \dots, a_{i1} = 0; \\ \dots; \\ \text{если } a_{i1} = 1, \text{ то } a_{11} = 0, a_{21} = 0, \dots, a_{i1} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_j^N t_j^k = \begin{cases} \text{если } a_{11} = 1, \text{ то } a_{12} = 0, a_{13} = 0, \dots, a_{1j} = 0; \\ \text{если } a_{12} = 1, \text{ то } a_{11} = 0, a_{13} = 0, \dots, a_{1j} = 0; \\ \text{если } a_{13} = 1, \text{ то } a_{11} = 0, a_{12} = 0, \dots, a_{1j} = 0; \\ \dots; \\ \text{если } a_{1j} = 1, \text{ то } a_{11} = 0, a_{12} = 0, \dots, a_{1j} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $t_i^k, t_j^x$  – технологические процессы, выполняемые с вагонами на каждой станции или время движения на участок  $k$  и  $x$ .

В процессе движения при наименьшем значении участков ( $k$ ) и наименьшем запасном расстоянии на каждой станции требуется составление графика подвижного состава в зависимости от суточного плана:

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}^{kx} t_{ij}^{kx}; \quad (8)$$

$$S = t_{v_i-d_i} + t_{s_i-d_i}, \quad (9)$$

где  $S$  – среднесуточное расстояние движения.

Начальная формула расчета выполнения операций на участке и на станции при доставке грузов:

$$\begin{cases} t_j + \left[ \left( \frac{l_{d_i}}{v_{v_i}} \right) / 24 \right] + t_o + t_q \leq T; \\ t_j + \left[ \left( t_{v_i-d_i} + t_{s_i-d_i} \right) / 24 \right] + t_o + t_q \leq T; \\ t_j > 0; \\ t_q > 0; \\ t_o \geq 0; \\ T \geq 1; \\ 1 \leq t_{v_i-d_i} + t_{s_i-d_i} \approx \frac{l_{d_i}}{v_{v_i}} \leq T, \end{cases} \quad (10)$$

где  $T$  – срок доставки грузов, сут;

$t_j$  – время, затрачиваемое на отправление вагонов со станции, сут.;

$t_{v_i-d_i}$  – время, затрачиваемое на операции выполняемые на станции, ч.;

$t_{s_i-d_i}$  – время, затрачиваемое на движение участкового поезда, ч.;

$l_{d_i}$  – расстояние доставки груза на железнодорожном транспорте, км;

$v_{v_i}$  – среднесуточная скорость движения вагона, км/ч.;

$t_{\text{доп.}}$  – время для дополнительных операций, сутки.

Для управления и контроля выполняемых технологических процессов, на основе теории Кьюинг был выполнен технический и коммерческий осмотр вагонов на станции. На графике (рисунок 7) видно стремление  $W_q$  к 30. Если выполнение операций будет стремиться к 30, то можно увидеть накопление вагонов.

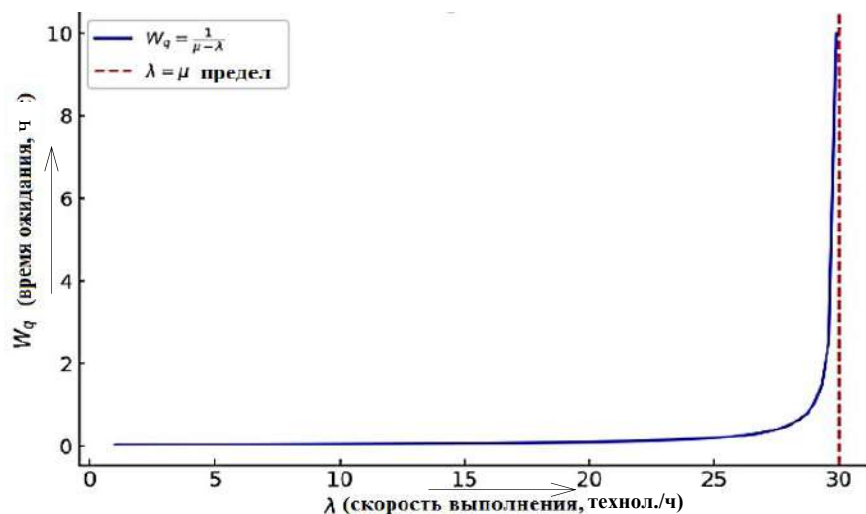


Рисунок 7 – Зависимость скорости выполнения технологических процессов от времени ожидания

Рисунок 7 показывает, что при последовательном выполнении операций приближения потока оказываемых услуг  $\lambda$  к максимальной мощности станции  $\mu$  будет наблюдаться резкое повышение ожидания  $W_q$ . Это в свою очередь показывает на накопление вагонов, т. е. при  $\lambda \rightarrow \mu$  увеличивается срок доставки груза. Применение Queueing theory дает возможность получения следующих результатов:

- обеспечение эффективной продолжительности времени для каждой операции;
- распределение нагрузки на технические станции;
- минимизация выполняемых технологических процессов;
- обеспечение материальной ответственности при доставке грузов клиентов.

Предложенная модель позволит определить время ожидания при выполнении технологических операций и пропорциональность последовательно выполняемых операций. Определено, что при приближении потока оказываемых услуг ( $\lambda$ ) к максимальной мощности станции ( $\mu$ ) наблюдается резкий рост продолжительности, и доказана необходимость управления технологическими процессами на основе нормативов.

Применение данной методики позволит планировать принятие эффективных решений при изучении факторов, влияющих на ожидание выполняемых технологических процессов для совершенствования доставки грузов. При больших расстояниях и скорости доставки грузов время на ожидание будет сокращаться. Данная модель позволит сократить время ожидания вагонов и наблюдать технологические процессы. С помощью цифровизации предложенных мероприятий можно ускорить доставку грузов. Разработанные мероприятия будут развивать договорные отношения с клиентами, при этом повысится конкурентоспособность железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Взаимовлияние подачи и уборки вагонов с грузового фронта на доставку грузов / Ж. С. Баротов, М. С. Ташматова, Ф. К. Самиев, Г. У. Файзуллаев. – Текст : непосредственный // Совершенствование науки и образования в области естественных и технических исследований : материалы XXXVI всерос. науч.-практ. конф. Ставрополь, 21 декабря 2023 г. – Ставрополь, 2023. – С. 190–194. – EDN KJTHAP.
2. Marinov, M., & Viegas, J. (2011). A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(1), 516-539, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.08.009>.
3. Hall, R., *Queuing Methods for Services and Manufacturing*, University of California at Berkeley, Prentice Hall International, Inc., 1991, ISBN 0-13-748112-8. <https://www.researchgate.net/publication/224775872>.
4. Bykadorov, S., Arpabekov, M., Khudayberganov, S., Suyunbayev, S., Khusenov, U., & Makhmudovna, M. (2023). About the model of railway transport management in Russia. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 389, p. 05024). EDP Sciences.
5. Shenfeld, K. P., Zakharov, S. M., & Cherkashin, Y. M. (2009). Studies and measures to provide wheel/rail performance of heavy and long train operation in the Russian Railways. In *Proceedings-9th International Heavy Haul Conference: "Heavy Haul and Innovation Development"* (pp. 1005-1011), <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84870184066&origin=AuthorNamesList&txGid>.
6. Разработка мероприятий по развитию транзитного потенциала Акционерного общества «Узбекистон Темир Йуллари» в международных грузоперевозках / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов, М. С. Ташматова, Г. У. Файзуллаев. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы современной экономики. – 2022. – № 10. – С. 754–761. – EDN СКСJNZ.
7. Кобулов, Ж. Р. Совершенствование системы грузоперевозок на железнодорожном транспорте при вагонных отправлениях / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов, Д. Ш. Бобоев. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы экономики и управления: наука и практика. Криулинские чтения : сборник материалов всерос. науч.-практ. конф., Курск, 15 мая 2021 г. / Курский государственный университет. – Курск, 2021. – С. 199–203. – EDN OBXEWE.
8. Кобулов, Ж. Р. Проблемы и решения своевременной доставки грузов на железнодорожном транспорте / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов, И. М. Тоштемиров. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2021. – № 11. – С. 16–21. – DOI 10.36535/0236-1914-2021-11-3. – EDN EDLUKS.
9. Кобулов, Ж. Р. Совершенствование математической модели срока доставки груза повагонной отправки на железнодорожном транспорте / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 129–138. – EDN HFUAUBX.
10. Мухамедова, З. Г. Определение оптимальной периодичности технического обслуживания аварийно-восстановительных автотоматрис / З. Г. Мухамедова, Ж. С. Баротов, М. С. Ташматова. – Текст : непосредственный // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 46. – С. 1074–1080. – EDN ESQJLU.
11. Кобулов, Ж. Р. Совершенствование выполнения сроков доставки грузов повагонных отправок методом математической статистики / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов, М. С. Ташматова. – Текст : непосредственный // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 46. – С. 842–854. – EDN CWKTWM.

References

1. Barotov J.S., Tashmatova M.S., Samiyev F.K., Fayzullayev G.U. [Interaction of supply and removal of warriors from the freight front on cargo delivery]. *Sovershenstvovanie nauki i obrazovaniia v oblasti estestvennykh i tekhnicheskikh issledovaniy : materialy XXXVI vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Improving science and education in the field of natural and technical research : proceedings of the XXXVI all-Russian Scientific and Practical Conference]. Stavropol, 2023, pp. 190-194. EDN KJTHAP. (In Russian).

2. Marinov, M., & Viegas, J. (2011). A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(1), 516-539, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.08.009>.

3. Hall, R., *Queuing Methods for Services and Manufacturing*, University of California at Berkeley, Prentice Hall International, Inc., 1991, ISBN 0-13-748112-8. <https://www.researchgate.net/publication/224775872>.

4. Bykadorov, S., Arpabekov, M., Khudayberganov, S., Suyunbayev, S., Khusenov, U., & Makhmudovna, M. (2023). About the model of railway transport management in Russia. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 389, p. 05024). EDP Sciences.

5. Shenfeld, K. P., Zakharov, S. M., & Cherkashin, Y. M. (2009). Studies and measures to provide wheel/rail performance of heavy and long train operation in the Russian Railways. In *Proceedings-9th International Heavy Haul Conference: "Heavy Haul and Innovation Development"* (pp. 1005-1011), <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84870184066&origin=AuthorNamesList&txGid>.

6. Kobulov Zh.R., Barotov Ja.S., Tashmatova M.S., Fayzullaev G.U. Development of measures to develop the transit potential of joint stock company "O'zbekiston temir yo'llari" in international cargo transportation. *Aktual'nye voprosy sovremennoy ekonomiki – Actual issues of the modern economy*, 2022, no. 10, pp. 754-761. EDN CKCJNZ. (In Russian).

7. Kobulov Ja.R., Barotov Ja.S., Boboyev D.Sh. [Improvement of the cargo transportation system by railway]. *Aktual'nye voprosy ekonomiki i upravleniya: nauka i praktika. Kriulinskie chteniia : sbornik materialov vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current issues of economics and management: science and practice. Kriulin readings : collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference]. Kursk, 2021, pp. 199-203. EDN OBXEWE. (In Russian).

8. Kobulov J.R., Barotov J.S., Toshtemirov I.M. Problems and solutions for timely delivery of cargoes by railway. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik – Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*, 2021, no. 11, pp. 16-21. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2021-11-3>. EDN EDLUKS. (In Russian).

9. Kobulov Ja.R., Barotov Ja.S. Improvement of the mathematical model of the delivery time of wagonload cargo by rail. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 4(48), pp. 129-138. EDN HFAUBX. (In Russian).

10. Mukhamedova Z.G., Barotov J.S., Tashmatova M.S. Determination of the optimal frequency of maintenance of emergency recovery vehicles. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie. – Innovation. Science. Education*, 2021, no. 46, pp. 1074-1080. EDN ESQJLU. (In Russian).

11. Kobulov J.R., Barotov J.S., Tashmatova M.S. Improving the fulfillment of delivery dates for wagon shipments by the method of mathematical statistics. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie. – Innovation. Science. Education*, 2021, no. 46, pp. 842-854. EDN CWKTWM. (In Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Баротов Жамшид Сайфуллаевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

Темирийулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТРУ.

Тел.: +998 (91) 778-10-11.

E-mail: jamshid-uzb92@mail.ru

##### Ташматова Мукаддас Садирходжаевна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

Темирийулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Старший преподаватель кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТРУ.

Тел.: +998 (93) 515-19-47.

E-mail: toshmatova.2021@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Barotov Jamshid Sayfullayevich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchiler st., 1, Tashkent City, the Republic of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, associate professor of the department "Transport cargo systems", TSTU.

Phone: +998 (91) 778-10-11.

E-mail: jamshid-uzb92@mail.ru

##### Tashmatova Mukaddas Sadirxodjayevna

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchiler st., 1, Tashkent City, the Republic of Uzbekistan.

Senior lecturer of the department "Transport cargo systems", TSTU.

Phone: +998 (93) 515-19-47.

E-mail: toshmatova.2021@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Баротов Ж. С. Мероприятия по ускорению доставки грузов в логистической цепи / Ж. С. Баротов, М. С. Ташматова – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 90 – 100.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Barotov J.S., Tashmatova M.S. Measures to accelerate cargo delivery in the logistics chain. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 90-100. (In Russian).

УДК 656.025:656.032

**Д. З. Икрамова**

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

**ПРОБЛЕМА ОТСУТСТВИЯ ИНТЕГРАЦИИ ТАРИФОВ МЕЖДУ ГОРОДСКИМ И ПРИГОРОДНЫМ ТРАНСПОРТОМ ТАШКЕНТСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ**

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема тарифной разобщенности городского и пригородного транспорта в пределах Ташкентской агломерации, которая приводит к повышенным расходам пассажиров и снижению эффективности использования инфраструктуры. Предметом исследования является процесс организации тарифного взаимодействия между различными видами транспорта и разработка экономически обоснованного механизма интеграции тарифов. Цель работы заключается в формировании единой схемы расчёта тарифа, позволяющей учитывать поездку на пригородном поезде как составную часть общего маршрута внутри городской транспортной сети.

Методологическая основа исследования включает в себя сравнительный анализ действующих тарифных схем, оценку их влияния на затраты пассажиров и разработку математической модели интегрированного тарифообразования. В качестве практического инструмента предлагается использование фиксированной скидки при пересадках, реализуемой через цифровую платформу АТТО. Методика интегрированного тарифа предусматривает автоматическое определение мультимодального маршрута, объединение всех поездок в единую транзакцию и применение регулируемой скидки при пересадке с пригородного поезда на городской транспорт.

Полученные результаты интегрированного тарифа подтверждают, что интеграция тарифов позволяет существенно снизить совокупные расходы пассажиров и повысить привлекательность железнодорожных перевозок. Область применения упомянутых результатов охватывает разработку тарифной политики, транспортное планирование, создание транспортно-пересадочных узлов и цифровых сервисов для управления пассажирскими потоками. В заключение делается вывод о том, что внедрение интегрированного тарифа на базе цифровых технологий способствует повышению доступности и удобства поездок, оптимизации транспортной системы агломерации и развитию устойчивой мобильности.

**Ключевые слова:** интегрированный тариф, общественный транспорт, пригородные перевозки, тарифная политика, Ташкент, цифровая платформа АТТО, экономическая эффективность, унификация тарифов.

**Diyorakhon Z. Ikramova**

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

**THE PROBLEM OF TARIFF DISINTEGRATION BETWEEN URBAN AND SUBURBAN TRANSPORT IN THE TASHKENT AGGLOMERATION**

**Abstract.** The article examines the problem of fare fragmentation between urban and suburban transportation within the Tashkent agglomeration, which leads to increased passenger expenses and reduced infrastructure efficiency. The subject of the study is the development of a coordinated fare interaction mechanism between different transport modes and the creation of an economically justified model of fare integration. The purpose of the research is to design a unified fare calculation scheme that incorporates a suburban train trip as an integral part of a multimodal journey within the city transport network.

The methodological framework includes a comparative analysis of the existing fare systems, assessment of their impact on passenger costs, and the development of a mathematical model for integrated fare formation. A practical approach is proposed in the form of a fixed transfer discount implemented through the ATTO digital platform. The method provides automatic identification of multimodal routes, unification of all trips into a single transaction, and the application of a regulated discount for transfers between suburban rail and urban transit services.

*The results demonstrate that fare integration significantly reduces total passenger expenses and increases the attractiveness of suburban rail transport. The practical relevance of the findings extends to fare policy development, transport planning, creation of transport hubs, and digital solutions for managing passenger flows. The study concludes that implementing an integrated fare system based on digital technologies will enhance travel accessibility and convenience, improve the efficiency of the agglomeration's transport system, and contribute to sustainable mobility development.*

**Keywords:** *integrated tariff, public transport, suburban mobility, fare policy, Tashkent, ATTO platform, economic efficiency, tariff unification.*

В настоящее время тарифная система общественного транспорта в Ташкенте формально использует единую платежную платформу АТТО, однако фактическая интеграция между городскими и пригородными перевозками отсутствует. Это проявляется в том, что при оплате проезда в пригородном поезде транзакция фиксируется только как отдельная поездка, и последующая пересадка на автобус или метро оплачивается по полной стоимости – 1 700 сум. Таким образом, пассажир не получает льготы, предусмотренную в рамках внутригородских пересадок, где в течение временного окна (обычно до 60 мин) применяется сниженный тариф порядка 1 100 сум [1].

Несмотря на наличие технической возможности в системе АТТО регистрировать пересадочные события между различными видами транспорта, функционал пересадочных скидок применяется лишь для комбинаций «автобус – метро» и «метро – автобус». Пригородные электрички, принимая оплату транспортной картой или банковской картой через валидаторы, не синхронизируются с пересадочным механизмом городской системы [1].

Это приводит к удорожанию комбинированной поездки для пассажиров. В качестве примера рассмотрим маршрут «Ташкент – Ходжикент + автобус по городу» (таблица 1).

Таблица 1 – Стоимость комбинированной поездки в действующей системе и при введении интегрированного тарифа

Вид поездки	Текущий тариф (сум)	Интегрированный тариф (сум)*
Пригородный поезд (оплата АТТО)	9 500	9 500
Автобус после выхода из электрички	1 700	1 100
Итого	11 200	10 600

\*В расчетах интегрированный тариф предполагает, что поездка на автобусе учитывается как пересадка с электрички и тарифицируется по сниженной ставке.

Из данных таблицы 1 видно, что отсутствие интеграции приводит к увеличению расходов пассажира на 600 сум при каждой комбинированной поездке. Для регулярных пользователей (ежедневных поездок на работу или учебу) это составляет около 12 – 13 тыс. сум в месяц при условии одной пересадки в день, что снижает привлекательность общественного транспорта и стимулирует использование альтернативных видов передвижения (личные автомобили, маршрутные такси).

Таким образом, можно заключить, что действующая система тарифов не обеспечивает единства городской и пригородной транспортной сети, что ограничивает возможности роста пассажиропотока и препятствует формированию полноценной мультимодальной модели перевозок. Решение данной проблемы требует внедрения интегрированного тарифа, включающего пригородные железнодорожные маршруты в общую систему пересадочных скидок.

Целью предлагаемой методики является обосновать необходимость и экономическую целесообразность внедрения интегрированного тарифа для комбинированных поездок «пригородный поезд → городской транспорт» в границах Ташкентской агломерации. В практической плоскости это означает количественную оценку трех взаимосвязанных групп эффектов:

1) финансовые последствия для операторов – прямые изменения выручки пригородного и городского перевозчика при переходе от отдельной оплаты к единому билету со скидкой;

2) прямые выгоды пассажиров – снижение суммарной стоимости поездки и экономия времени при пересадках;

3) внешние (социальные) эффекты – сокращение дорожных заторов и выбросов парниковых газов за счет частичной переориентации поездок с личных автомобилей на общественный транспорт.

Практическая задача – с помощью общепринятого инструментария экономического анализа [2] показать, при каких сочетаниях параметров (размер скидки, доля комбинированных поездок, величина маржинальных издержек оператора и др.) интеграция тарифа приносит положительный чистый социальный эффект, а также определить ориентиры для бюджетного субсидирования в период внедрения интегрированного тарифа. Методологическая основа работы – руководящие документы ЕС и Всемирного банка по оценке транспортных проектов, а также методики, применимые к условиям перехода на безналичную оплату и цифровую тарификацию.

Обозначения и основные соотношения интегрированного тарифа:

$S$  – цена пригородной поездки при безналичной оплате (UZS);

$C$  – городской тариф. Для анализа рассматриваются два состояния:  $C = 1\,100\text{ UZS}$  (пересадка распознается системой АТТО как внутренняя) и  $C = 1\,700\text{ UZS}$  (пересадка не распознается и пассажир платит полный городской тариф). Информация по действующим тарифам АТТО: 1-я поездка – 1 700 сум, пересадка – 1 100 сум и т. д.;

$D$  – фиксированная скидка, предлагающаяся при интеграции (в анализе: 500; 1 000; 1 500 сум);

$N_{\text{мес}}$  – месячный объем пригородных пассажиров;

$p$  – доля пассажиров, совершающих комбинированную поездку (30, 50, 70 %).

$$N_{\text{комб}} = p \cdot N_{\text{мес}} \quad (1)$$

В рамках оценки последствий введения интегрированного тарифа ключевыми элементами являются анализ перераспределения доходов между операторами и выявление потенциальных потерь. Для этого используется несколько базовых формул.

Интегрированный тариф, который оплачивает пассажир за комбинированную поездку «пригородный поезд → городской транспорт», формализуется:

$$T_{\text{инт}} = (S + C) - D, \quad (2)$$

где  $S$  – цена пригородной поездки при безналичной оплате (UZS);

$C$  – городской тариф. Для анализа рассматриваются два состояния:  $C = 1\,100\text{ UZS}$  (пересадка распознается системой АТТО как внутренняя) и  $C = 1\,700\text{ UZS}$  (пересадка не распознается и пассажир платит полный городской тариф). Информация по действующим тарифам АТТО: 1-я поездка – 1 700 сум, пересадка – 1 100 сум и т. д.;

$D$  – фиксированная скидка, предлагающаяся при интеграции (в анализе: 500; 1 000; 1 500 сум).

Для распределения выручки между пригородным и городским операторами в базовой модели используется пропорциональное правило (прозрачный и простейший метод, применяемый в пилотных исследованиях): доля пригородного оператора по величине исходного вклада:

$$\alpha = \frac{S}{S+C}, \quad (3)$$

следовательно, выручка пригородного оператора с одного комбинированного билета

$$R = T_{\text{инт}} \cdot \alpha = T_{\text{инт}} \cdot \frac{S}{S+C}. \quad (4)$$

Формула (4) отражает принцип «распределения по вкладу» и служит отправной точкой; при необходимости модель допускает замену на иные правила распределения (фиксированные коэффициенты, регулируемые соглашения и т. д.).

Потеря пригородного оператора на одной комбинированной поездке

$$L = S - R. \quad (5)$$

Совокупная месячная потеря

$$L_{\text{потеря}} = L \cdot N_{\text{комб}}. \quad (6)$$

Если оператор привлекает дополнительных, ранее не пользовавшихся услугой пассажиров, их маргинальная прибыль для оператора

$$M = R - MC, \quad (7)$$

где  $MC$  – маргинальные (переменные) издержки на обслуживание одного дополнительного пассажира (затраты топлива/электроэнергии, персонала, переменные операционные расходы). При  $M > 0$  требуемое число новых пассажиров, компенсирующее  $L_{\text{потеря}}$ , вычисляется по уравнению

$$N = \frac{L_{\text{потеря}}}{M}. \quad (8)$$

### Оценка выгод пассажиров и внешних эффектов.

1) Экономия непосредственных расходов пассажиров (фискальная экономия). При переходе на интегрированный тариф каждый комбинированный пассажир получает абсолютную экономию  $D$  UZS, поэтому суммарная экономия пассажиров в месяц:

$$S_{\text{пасс}} = D \cdot N_{\text{комб}}. \quad (9)$$

2) Экономия времени (VTTS). Важнейший социальный эффект – сокращение времени, связанного с поиском билетов, ожиданием и пересадками. Денежно этот эффект оценивается через показатель VTTS (Value of Travel Time Savings), выражаемый в UZS/ч. В разработанной методике используется ориентир VTTS для локальных условий, полученный путем адаптации международных источников; в расчетах применены сценарии экономии  $\Delta t = 5, 10$  и  $15$  мин. Денежная оценка экономии времени

$$S_{\text{время}} = VTTS \cdot \Delta t \cdot N_{\text{комб}}, \quad (10)$$

где,  $\Delta t$  – в часах (например,  $10$  мин =  $1/6$  ч). Для обоснования выбора VTTS используются рекомендации по оценке времени в транспортных проектах [6].

3) Экологический эффект (снижение выбросов  $\text{CO}_2$ ). Переход части пассажиров с личных автомобилей на общественный транспорт дает снижение выбросов. Оценка строится на следующих шагах [3]:

– вычисление разницы эмиссий ( $\text{г CO}_2$ ) на пассажиро-километр для альтернатив «авто» и «поезд + автобус»;

– умножение на среднее расстояние поездки ( $\text{ркм}$ );

– перевод сокращения массы  $\text{CO}_2$  в денежный эквивалент через Social Cost of Carbon (SCC), принятый в сценарии как  $50 - 190$  \$/т (перевод в UZS – по выбранному курсу):

$$S_{\text{CO}_2} = N_{\text{авто}} \cdot e \cdot SCC, \quad (11)$$

где  $N_{\text{авто}}$  – число новых пассажиров, пришедших из автосегмента,  $e$  – сокращение  $\text{CO}_2$  на одного пассажира (в килограммах),  $SCC$  – стоимость  $1$  кг  $\text{CO}_2$  в UZS.



Поскольку  $L_{\text{потеря}}$  представляет собой реальную потерю выручки пригородного оператора, предлагается проанализировать несколько схем компенсации:

- прямая компенсация (полное покрытие): субсидия =  $L_{\text{потеря}}$ ;
- частичное покрытие: субсидия =  $\beta \cdot L_{\text{потеря}}$ , где  $\beta \in [0,1]$ .
- пер-пассажирная (от англ. per passenger – на одного пассажира) выплата + бонус за рост: субсидия =  $\beta \cdot L_t + \gamma \cdot N$ .

Итоговая величина чистой социально-экономической выгоды ( $N_{\text{итог}}$ ) записывается так:

$$N_{\text{итог}} = (S_{\text{пасс}} + S_{\text{время}} + S_{\text{CO}_2}) - \text{субсидия}. \quad (12)$$

Положительное значение  $N_{\text{итог}}$  означает социальную оправданность проекта; отрицательное значение указывает на необходимость пересмотра тарифной политики или схемы компенсации.

Для проведения анализа использованы достоверные статистические и нормативные материалы, характеризующие текущее состояние транспортной системы Ташкентского железнодорожного узла и городского общественного транспорта.

Для сопоставления сценариев удобно представить результаты в табличной форме (таблица 2). В таблице учитываются три варианта скидки ( $D = 500, 1\ 000, 1\ 500$  сум) и две доли комбинированных пассажиров ( $p = 0,3$  и  $p = 0,5$ ).

Таблица 2 – Итоговые показатели при различных сценариях интеграции тарифа

Параметр	D = 500, p = 0,3	D = 1000, p = 0,3	D = 1500, p = 0,3	D = 500, p = 0,5	D = 1000, p = 0,5	D = 1500, p = 0,5
Потери оператора, млн сум	11,4	22,8	34,2	19,0	38,1	57,1
Экономия пассажиров, млн сум	13,6	27,3	41,0	22,7	45,4	68,1
Экономия времени, млн сум	18,1	18,1	18,1	30,2	30,2	30,2
Экономия от CO <sub>2</sub> , млн сум	7,5	7,5	7,5	12,5	12,5	12,5
Чистая социальная выгода, млн сум	+27,8	+30,1	+32,4	+46,4	+50,0	+53,7

Данные таблицы 2 демонстрируют, что при любых сценариях (даже при увеличении скидки до 1 500 сум) общественные выгоды превышают бюджетные затраты на компенсацию операторам. Это подтверждает социальную оправданность интеграции тарифа.

Важным элементом экономического обоснования является проверка устойчивости результатов при изменении ключевых параметров модели (sensitivity analysis). Для интегрированного тарифа Ташкентского транспортного узла критически значимыми являются три фактора:

*доля комбинированных пассажиров (p).* Повышение этой доли отражает степень привлекательности новой тарифной системы. При  $p = 0,3$  совокупная выгода общества оценивается в диапазоне 27 – 32 млн сум/мес., тогда как при  $p = 0,5$  значение возрастает до 46 – 54 млн сум/мес. (см. таблицу 2);

*размер скидки (D).* Рост величины  $D$  снижает поступления оператора, но увеличивает экономию пассажиров. Анализ показал, что при увеличении скидки с 500 до 1 500 сум чистый социальный эффект растет (с +27,8 до +53,7 млн сум), что подтверждает высокую эластичность спроса;

*маржинальные издержки перевозчика (MC).* Принимая  $MC = 1\ 000$  сум/пасс., привлечение дополнительных 10 % пассажиров приносит пригородному оператору около 7,7 млн сум/мес. дополнительного дохода. При  $MC = 1\ 500$  сум выгода снижается почти вдвое, что показывает чувствительность модели к реальным затратам.

Таким образом, интегрированный тариф сохраняет положительный баланс социальных выгод даже при неблагоприятных параметрах, что подтверждает устойчивость результатов.

## **Государственное субсидирование.**

Для балансировки интересов общества и перевозчика требуется механизм компенсации. Рассмотрим три варианта распределения субсидий:

*вариант А (минимальная компенсация):* государство покрывает только прямые потери пригородного оператора  $L_{\text{потеря}}$ ;

*вариант В (пропорциональная компенсация):* компенсируются потери обоих операторов (поезд + автобус) пропорционально их доле в тарифе;

*вариант С (оптимальный социальный):* субсидия устанавливается как часть совокупной социальной выгоды ( $\beta = 0,5$ ), что позволяет государству снижать бюджетную нагрузку, сохраняя стимулы для операторов.

Расчеты показывают, что при среднем варианте (В) бюджетная потребность составляет 38 – 57 млн сум/мес., тогда как общественные выгоды достигают 50 – 70 млн сум. В оптимальном варианте (С) затраты бюджета ограничиваются 25 – 30 млн сум при сохранении положительного социального эффекта.

## **Социально-экологический эффект.**

Интеграция тарифов оказывает не только прямое экономическое воздействие, но и формирует долгосрочные социальные и экологические выгоды.

*Повышение мобильности населения.* Снижение барьеров пересадки увеличивает доступность образовательных и рабочих мест для жителей пригородных районов, особенно в направлении Хаджикент и Хаваст.

*Экономия времени и расходов.* Пассажиры выигрывают не только за счет снижения тарифа, но и благодаря уменьшению времени пересадок (до 10 – 15 мин), что по международным стандартам является значимым фактором качества транспортной услуги.

*Снижение выбросов CO<sub>2</sub>.* Даже при консервативном сценарии (10 % переход с автомобиля) предотвращается до 20 тонн выбросов ежемесячно. В пересчете на социальную стоимость углерода это соответствует 20 – 30 млн сум экономии внешних издержек [3].

*Сбалансированное развитие транспортной системы* [4]. Единый тариф стимулирует переход на более экологичные виды транспорта и снижает нагрузку на автомобильные дороги, что соответствует стратегическим целям Республики Узбекистан по устойчивому развитию транспортной системы.

В результате проведенных расчетов установлено, что внедрение интегрированного тарифа в системе «пригород – город» Ташкентского транспортного узла является социально и экономически оправданным. Несмотря на необходимость частичной бюджетной поддержки, совокупные выгоды населения и общества – экономия времени, снижение транспортных расходов и уменьшение внешних издержек от загрязнения – существенно превышают прямые затраты государства. Интегрированный тариф формирует основу для развития мультимодальной транспортной системы, ориентированной на устойчивую мобильность и повышение качества жизни населения.

## *Список литературы*

1. АТТО: электронная система оплаты в общественном транспорте Ташкента // Tashkent Transport. – Текст : электронный. – URL: <https://tashbus.uz/> (дата обращения: 06.09.2025).
2. Cost benefit analysis // en.wikipedia.org : сайт. – Текст : электронный. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cost%E2%80%93benefit\\_analysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Cost%E2%80%93benefit_analysis) (дата обращения: 06.09.2025).
3. Милякин, С. Р. Снижение выбросов CO<sub>2</sub> в городах: электромобили или общественный транспорт / С. Р. Милякин. – Текст : непосредственный // ЭКО. – 2022. – № 12 (582). – С. 32–51. – DOI 10.30680/ECO0131-7652-2022-12-32-51. – EDN KYGXXL.

4. Ханалиев, Г. И. Моделирование сбалансированного развития транспортного комплекса / Г. И. Ханалиев. – Текст : непосредственный // Социально-экономические явления и процессы. – 2012. – № 3 (37). – С. 123–128. – EDN PDEDXL.

## References

1. *ATTO: elektronnaia sistema oplaty v obshchestvennom transporte Tashkenta* [ATTO: electronic payment system for public transport in Tashkent]. Available at: <https://tashbus.uz/> (accessed 06.09.2025).

2. Cost benefit analysis. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cost%E2%80%93benefit\\_analysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Cost%E2%80%93benefit_analysis) (accessed 06.09.2025).

3. Milyakin S.R. Reducing CO2 emissions in cities: electric cars or public transport. *ÉKO – ECO*, 2022, no. 12(582), pp. 32-51. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2022-12-32-51>. EDN KYGXXL. (In Russian).

4. Khanaliyev G.I. Modelling of the balanced development of the transport complex. *Sotsial'no-ekonomicheskie iavleniia i protsessy – Social-Economic Phenomena and Processes*, 2012, no. 3(37), pp. 123-128. EDN PDEDXL. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Икрамова Диёрахон Зокирджон кизи

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Адылходжаева ул., д. 1, Мирабадский р-н, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Соискатель ученой степени Ph. D. на кафедре «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (97) 547-88-94.

E-mail: diyora.ikramova.94@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Ikramova Diyorakhon Zokirjon kizi

Tashkent State Transport University (TSTU).

1 Adilkhujayev st., Mirobod, Tashkent, Uzbekistan.

Ph. D. candidate at the department “Transport cargo systems”, TSTU.

Phone: +998 (97) 547-88-94.

E-mail: diyora.ikramova.94@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Икрамова, Д. З. Проблема отсутствия интеграции тарифов между городским и пригородным транспортом Ташкентской агломерации / Д. З. Икрамова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 100 – 106.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ikramova D.Z. The problem of tariff disintegration between urban and suburban transport in the Tashkent agglomeration. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 100-106. (In Russian).

УДК 614.849

**В. И. Сеницин<sup>1</sup>, М. С. Цыганков<sup>2</sup>, Б. В. Палагушкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет водного транспорта (СГУВТ), г. Новосибирск, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

## ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ТРАНСФОРМАТОРА

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос о пожарной опасности диэлектрической среды трансформатора (трансформаторного масла), в котором за период эксплуатации изменяются характеристики, в том числе и пожароопасные свойства. Целью работы является исследование трансформаторной диэлектрической среды (трансформаторного масла) на воспламеняемость. В статье приведены результаты лабораторных испытаний нового и отработанного трансформаторного масла по определению параметров температуры воспламенения и температуры вспышки. Проанализированы статистические данные по пожарам, связанным с электрооборудованием. Установлено, что при длительной и интенсивной выработке физико-химические свойства трансформаторного масла ухудшаются. Представленные результаты исследований подтверждают, что трансформаторное масло может превращаться из горючей жидкости в более пожароопасную легковоспламеняющуюся жидкость. Исследования по определению температуры

вспышки и воспламенения производились с помощью лабораторного оборудования по ГОСТ 12.1.044–2018. Исследовалась причина такого критического превращения и проводился более углубленный анализ образцов нового и отработанного трансформаторного масла с помощью хроматографа «Кристаллюкс-4000М». Установлено, что за период эксплуатации трансформаторное масло теряет свои свойства, в том числе повышается пожарная опасность, а именно температура воспламенения, и температура вспышки снижается на 19 и 32,2 % соответственно. Выявлено, что из-за изменений в химической структуре масла ухудшается показатель его пожаробезопасности. Акцентируется внимание на актуальности проблемы своевременной замены трансформаторного масла, так как именно оно является одним из основных источников пожарной опасности. Предлагаются пути решения названной проблемы в виде более тщательного контроля за состоянием трансформаторного масла и сроком его замены.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, трансформатор, трансформаторное масло, температура вспышки, температура воспламенения, хроматограф, горючесть.

Vladislav I. Sinitsin<sup>1</sup>, Mikhail S. Tsygankov<sup>2</sup>, Boris V. Palagushkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State University of Water Transport (SSUWT), Novosibirsk, the Russian Federation;

<sup>2</sup>Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, the Russian Federation

## FIRE HAZARD OF THE TRANSFORMER DIELECTRIC MEDIUM

**Abstract.** The article discusses the issue of the fire hazard of the dielectric medium of a transformer (transformer oil), in which, over the period of operation, the characteristics, including fire-hazardous properties, change. The purpose of the work is to study the transformer dielectric medium (transformer oil) for flammability. The article presents the results of laboratory tests of new and used transformer oil to determine the parameters of the ignition temperature and flash point. Statistical data on fires related to electrical equipment are analyzed. It has been established that with prolonged and intensive production, the physico-chemical properties of transformer oil deteriorate. The presented studies confirm that transformer oil can transform from a flammable liquid into a more flammable liquid. Studies to determine the flash point and ignition were carried out using laboratory equipment in accordance with GOST 12.1.044-2018. The reason for this critical transformation is being investigated and a more in-depth analysis of samples of new and used transformer oil is carried out using a Crystallux-4000M chromatograph. It has been established that during the period of operation, transformer oil loses its properties, including an increased fire hazard, namely, the ignition temperature and flash point decrease by 19% and 32.2%, respectively. It has been revealed that due to changes in the chemical structure of the oil, its fire safety index is deteriorating. Attention is focused on the urgency of the problem of timely replacement of transformer oil, as it is one of the main sources of fire danger. Ways to solve it are proposed in the form of: more thorough monitoring of the condition and replacement time of transformer oil.

**Keywords:** fire safety, transformer, transformer oil, flash point, ignition temperature, chromatograph, flammability.

Современное развитие человеческого общества находится на уровне, где почти невозможно обойтись без использования электричества. Для работы огромного количества агрегатов, узлов и механизмов используется электрическая энергия. Практически все люди будут испытывать дискомфорт без качественной и постоянной подачи электроэнергии, а производства будут сталкиваться с перебоями в работе.

Важной частью электрической сети является трансформатор. Его роль заключается в трансформации переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Диэлектрическая среда для трансформаторного оборудования исключительно важна. Она необходима для отвода тепла от токоведущих частей. В качестве диэлектрической среды могут выступать газ, воздух и жидкость. Для описания диэлектрической среды используют такие свойства, как электрическая прочность, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери и др. [1]. Однако из всех свойств диэлектрической среды не стоит исключать такую важную характеристику, как пожарная опасность. Так, в процессе эксплуатации масляных трансформаторов происходит отвод тепла диэлектрической средой от их обмоток. Из-за постоянного нагрева диэлектрическая среда в виде трансформаторного масла теряет свои как диэлектрические, так и пожаробезопасные свойства, поэтому трансформаторное масло подлежит периодической замене. Трансформаторные масла представляют собой горючие жидкости с температурой вспышки 135 °С [2].

Согласно данным статистического сборника Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны (ВНИИПО) МЧС России «Пожары и пожарная

безопасность в 2024 г.» по причине нарушения правил эксплуатации электрооборудования в период с 2020 по 2024 г. произошло 295 148 пожаров, что составляет 15,6 % от общего количества пожаров. Погибло 11 034 человека, что составляет 27,61 % от общего числа погибших на пожарах людей [3].

При рассмотрении отчетного периода времени видно, что на трансформаторах произошло 1814 пожаров. Основной причиной возникновения аварийных ситуаций на трансформаторах является превышенный срок эксплуатации трансформаторного масла, а именно диэлектрической среды.

Таблица 1 – Распределение основных показателей пожаров с 2020 по 2024 гг.

Показатель пожара	Год				
	2020	2021	2022	2023	2024
Количество пожаров, ед.	51930	57766	59783	60874	64795
Прямой материальный ущерб, тыс. руб.	13250190	7042790	11271831	9556963	10945634
Погибло, чел.	1942	2325	2216	2251	2300
Трансформатор	478	478	317	277	264

При описании пожарной опасности трансформаторов стоит обратить особое внимание на то, что трансформаторное масло, выступающее горючей жидкостью, является отличным распространителем пламени по поверхности при разливе. Это необходимо учитывать при проектировании и установке трансформаторов. Отсюда возникает необходимость разобраться с качествами диэлектрической среды при ее выработке. В настоящее время ведется разработка более совершенных трансформаторных масел [4], но повсеместно используются менее дорогие. Было решено сравнить показатели пожарной опасности трансформаторного масла марки Т-750 [5]. За основу были взяты два образца – новое и отработанное масло с наработкой в 10 лет.

В ходе проведения исследований были использованы следующие методы качественного и количественного анализа жидкости:

- 1) метод экспериментального определения температуры вспышки жидкостей в открытом тигле [6];
- 2) метод экспериментального определения температуры воспламенения жидкостей [6];
- 3) исследование методом газожидкостной хроматографии [8].

В первую очередь для определения физико-химических свойств нового (образец № 1) и отработанного (образец № 2) масла были установлены значения температуры вспышки и воспламенения жидкости в открытом тигле. Для этого была использована установка «ЛТВО, заводской номер № 0015».

Температура воспламенения – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары, способные вспыхивать в воздухе от источника зажигания и продолжать гореть не менее 5 с после его удаления [6].

Сущность метода экспериментального определения температуры воспламенения жидкостей заключается в нагревании определенного количества жидкости в открытом тигле с заданной скоростью, периодическим зажиганием выделяющихся паров и установлением факта наличия или отсутствия воспламенения с последующим горением в течение более 5 с при фиксируемой температуре. В таблицах 2 и 3 приведены результаты испытаний образцов № 1 и № 2.

В ходе проведенного исследования было установлено, что температура воспламенения образца № 1 равна 144 °С, а образца № 2 – 117 °С.

Температура вспышки – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары, способные вспыхивать в воздухе от источника зажигания, устойчивого горения при этом не возникает [6].

Таблица 2 – Результаты испытания образца № 1 по определению температуры воспламенения

№ п/п	Скорость нагревания образца, °С/мин	Температура испытания, °С	Результат испытания	Температура воспламенения, °С
1	5	142	–	–
2	5	143	–	–
3	5	144	+	144
4	5	144	+	144
5	5	144	+	144
6	5	144	+	144
7	5	143	–	–

Таблица 3 – Результаты испытания образца № 2 по определению температуры воспламенения

№ п/п	Скорость нагревания образца, °С/мин	Температура испытания, °С	Результат испытания	Температура воспламенения, °С
1	5	115	–	–
2	5	116	–	–
3	5	117	+	117
4	5	117	+	117
5	5	117	+	117
6	5	117	+	117
7	5	116	–	–

Сущность метода экспериментального определения температуры вспышки жидкостей в открытом тигле (таблицы 4 и 5) заключается в нагревании определенного количества жидкости в тигле с заданной скоростью, периодическим зажиганием выделяющихся паров и установлением факта наличия или отсутствия воспламенения при фиксируемой температуре.

Таблица 4 – Результаты испытания образца № 1

№ п/п	Скорость нагревания образца, °С/мин	Температура испытания, °С	Результат испытания	Температура вспышки, °С
1	5	87	–	–
2	5	88	–	–
3	5	89	+	89
4	5	89	+	89
5	5	89	+	89
6	5	89	+	89
7	5	58	–	–

Таблица 5 – Результаты испытания образца № 2

№ п/п	Скорость нагревания образца, °С/мин	Температура испытания, °С	Результат испытания	Температура вспышки, °С
1	5	59	–	–
2	5	60	–	–
3	5	61	+	61
4	5	60	+	60
5	5	60	+	60
6	5	60	+	60
7	5	59	–	–

Результатом эксперимента стал тот факт, что разница температуры вспышки образцов № 1 и № 2 соответствует 29 °С, что подтверждается данными таблиц 4 и 5.

По полученным результатам можно сделать промежуточный вывод о том, что в ходе эксплуатации масло превращается из горючей жидкости в легковоспламеняемую жидкость даже при условии обращения в замкнутом контуре.

Обратимся к принятым понятиям легковоспламеняющейся жидкости и горючей жидкости. Согласно стандарту [6] легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ) – жидкость, способная самостоятельно гореть после удаления источника зажигания и имеющая температуру вспышки не выше 61 °С;

Горючая жидкость (ГЖ) – это жидкость, способная самостоятельно гореть после удаления источников зажигания и имеющая температуру вспышки выше 61 °С [6].

Для углубленного исследования был применен метод газожидкостной хроматографии (ГЖХ). Данный метод позволяет разделить и определить вещества, основываясь на распределении компонентов смеси между двумя фазами – подвижной и неподвижной. Метод ГЖХ основан на различии скоростей перемещения отдельных компонентов сложных многокомпонентных смесей вместе с подвижной фазой вдоль стационарной неподвижной фазы, в результате чего происходит их разделение [8].

Анализ основан на сравнении времен удерживания пиков на хроматограмме неизвестного состава с таковыми для известных составов. Газожидкостная хроматография является основным аналитическим методом, применяющимся при анализе сложных смесей, в том числе нефтепродуктов, которые являются легковоспламеняющимися и горючими жидкостями. Разделение остатков ЛВЖ (ГЖ) осуществляется на хроматографических капиллярных колонках [8].

Исследование проводилось на хроматографе «Кристаллюкс-4000М», изготовленном по ТУ 4300-002-41390585-2002 ООО НПФ «Мета-Хром», з/н 637. Хроматограф снабжен пламенно-ионизационным детектором (ПИДом) [8].

Для анализа использовали высокоэффективную кварцевую капиллярную колонку марки Zebron-50 (30 м · 0,25 мм · 0,25 мкм), на внутренние стенки которой нанесена жидкая фаза, состоящая из 50 % фенила и 50 % диметилполисилоксанов. Такие колонки используются для разделения сложных смесей в температурном интервале от 40 до 320 °С. Обработка хроматограмм осуществлялась с помощью программного обеспечения «NetChrom» [8].

В таблице 6 приведены характеристики показателей для хроматографического анализа.

Таблица 6 – Условия хроматографического анализа

№ п/п	Наименование показателя и единица измерения	Количественная характеристика
1	Температура детектора, °С	300,00
2	Температура испарителя, °С	290,00
3	Начальная температура термостата колонок, °С	40,00
4	Скорость подъема температуры колонки, °С /мин	4,00
5	Конечная температура колонки, °С	250,00
6	Время изотермы, мин	5,00
7	Деление потока	1:40
8	Газ-носитель	Гелий марки А
9	Объем анализируемой пробы, мкл	1,0

Поскольку для более легкого хроматографического разделения смеси использовался гексановый раствор трансформаторного масла (рисунки 2, 3), отдельно приводится хроматограмма растворителя гексан марки ОСЧ (особо чистый), сорт 1, изготовленный НПК «Криохром» г. Санкт-Петербург (рисунок 1).

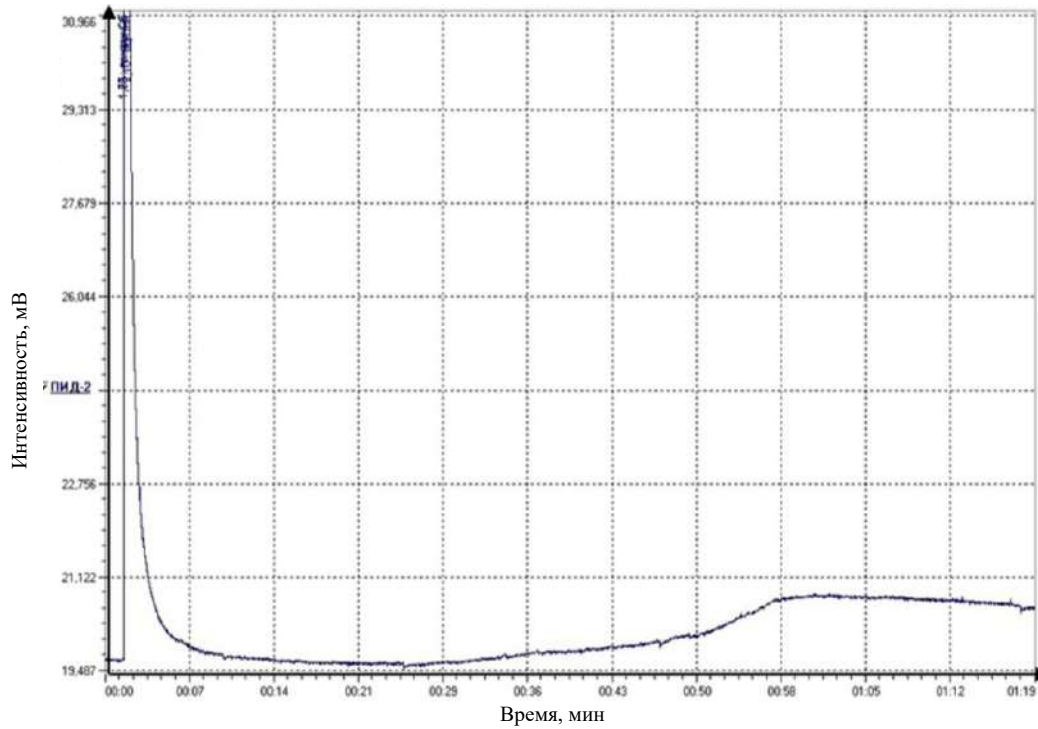


Рисунок 1 – Хроматограмма чистого гексана

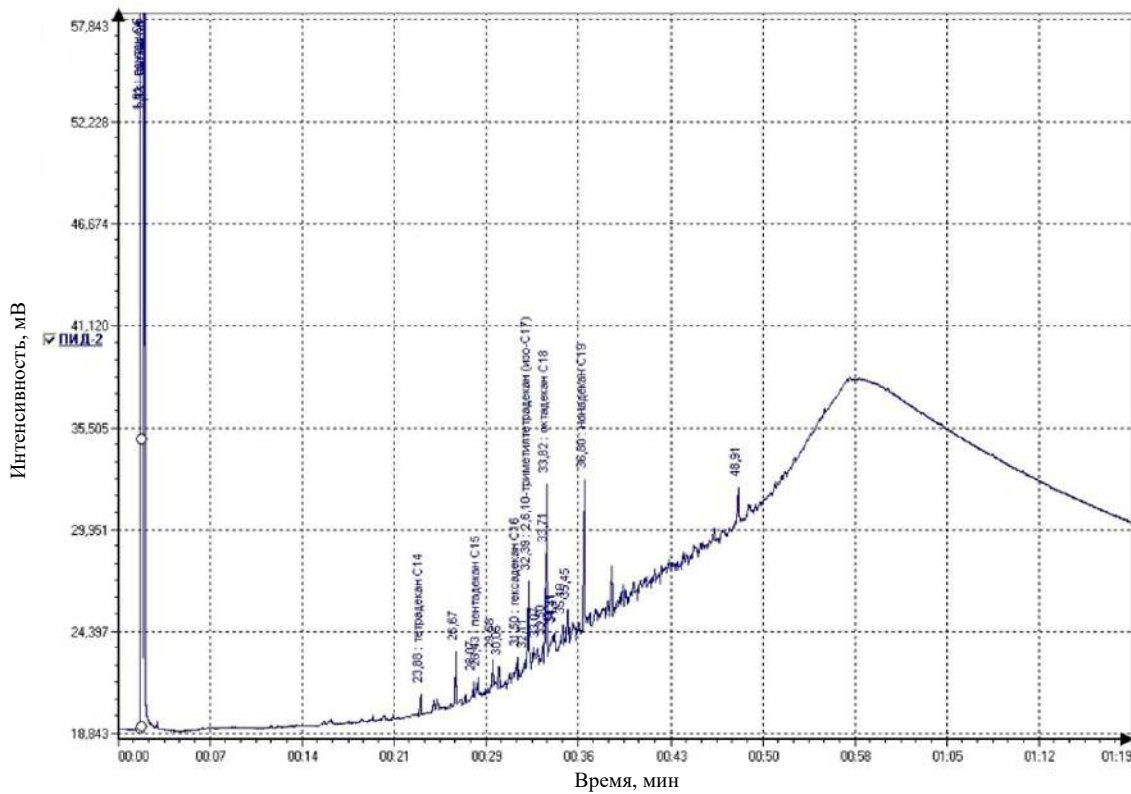


Рисунок 2 – Хроматограмма гексанового раствора нового трансформаторного масла



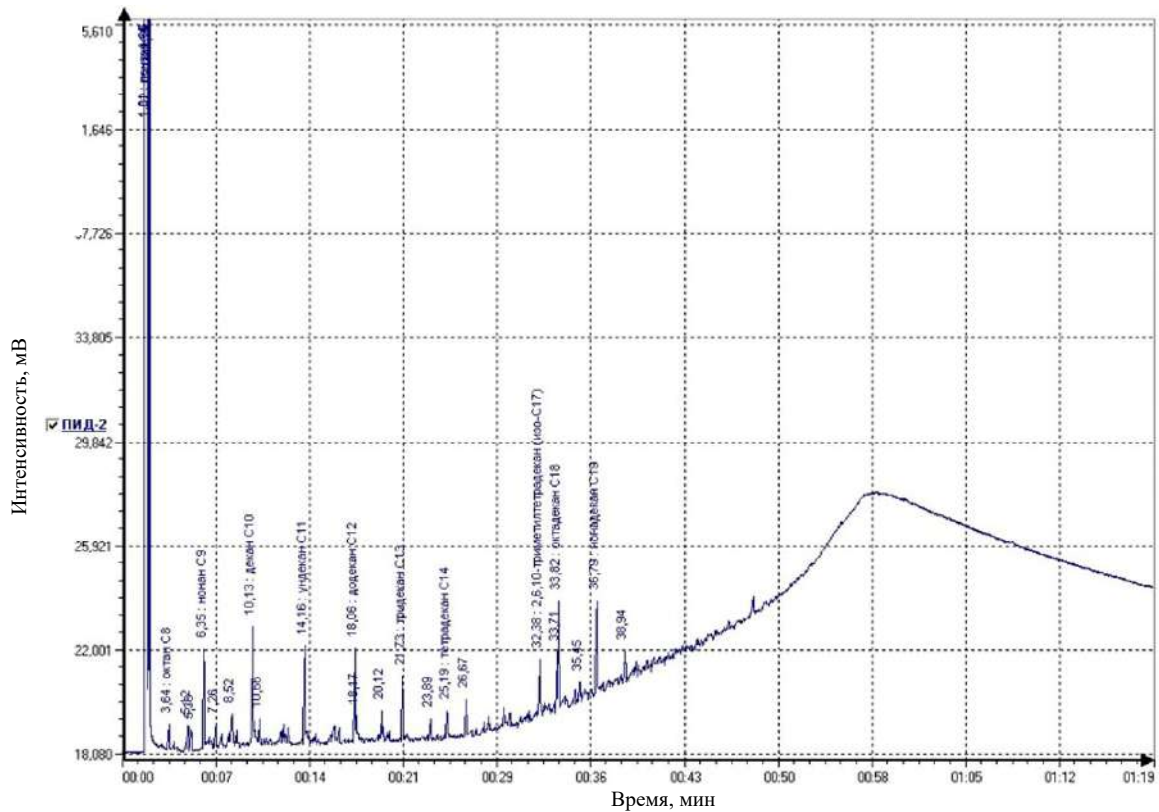


Рисунок 3 – Хроматограмма гексанового раствора отработанного трансформаторного масла

Исходя из результатов испытаний, представленных на рисунках 4 и 5, можно сделать выводы по ухудшению безопасности трансформаторных масел из-за их структурного изменения в процессе эксплуатации как со стороны пожарной опасности, так и со стороны ухудшения эксплуатационных характеристик. Изменение таких характеристик способно привести к нарушениям в работе и перегреву трансформатора с последующим возгоранием.

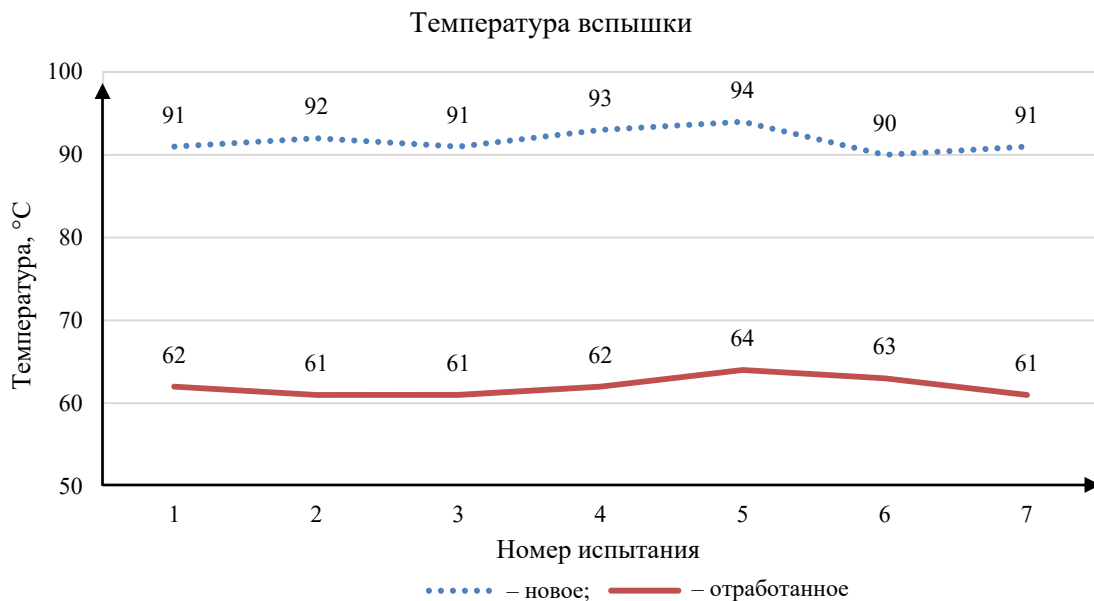


Рисунок 4 – Диаграмма испытаний на определение температуры вспышки

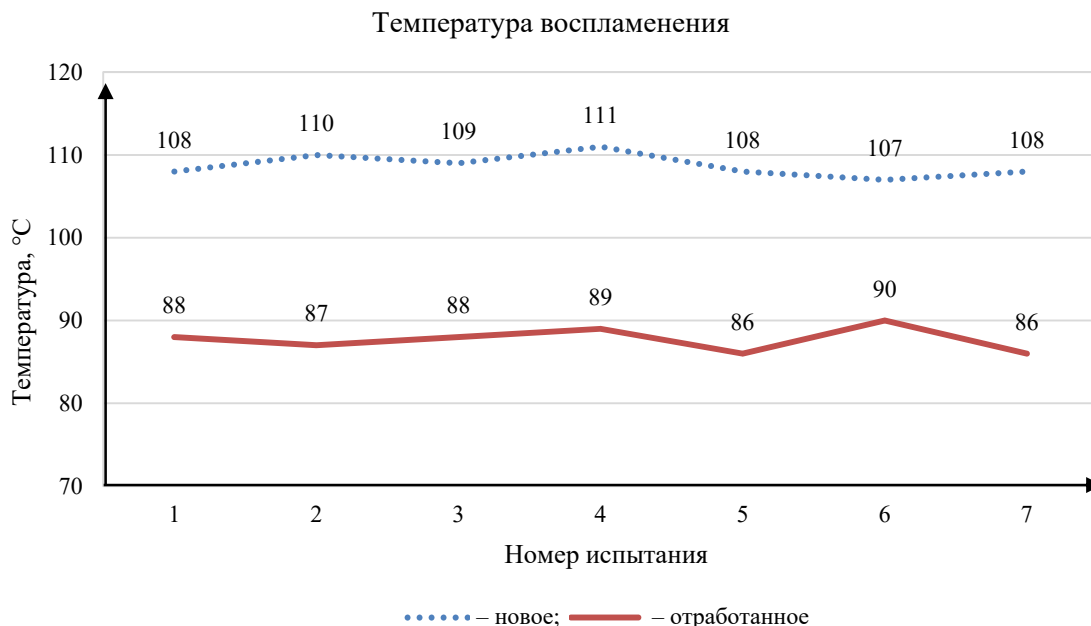


Рисунок 5 – Диаграмма испытаний на определение температуры воспламенения

По своему составу и температуре вспышки образец отработанного трансформаторного масла можно отнести к наиболее пожароопасным ЛВЖ, так как в ходе проведения испытаний была получена температура вспышки 61 °С (см. рисунок 4).

Хроматографические исследования показали отличные друг от друга хроматограммы нового и отработанного масел. Для идентификации наиболее интенсивных хроматографических пиков было использовано программное обеспечение «NetChrom», в базе которого присутствуют снятые заранее реперные пики нормальных алканов и их изомеров.

В хроматограмме нового трансформаторного масла наблюдаются хроматографические пики в области времен удерживания от 20 до 50 мин (см. рисунок 2). Из специальной литературы [9] известно, что к соединениям с временем удерживания от 20 до 50 мин относятся компоненты среднестиллятной фракции нефти. На хроматограмме (см. рисунок 2) видно присутствие n-алканов и их изомеров с длиной углеродной цепи от C14 и больше.

В хроматограмме отработанного трансформаторного масла наблюдаются хроматографические пики в области времен удерживания от 3 до 40 мин (см. рисунок 3). Из специальной литературы [9] известно, что к соединениям с временем удерживания до 25 мин относятся компоненты бензиновой фракции нефти (ароматические и алифатические углеводороды) и представители других классов химических соединений. Время удерживания, количество и интенсивность хроматографических пиков хроматограммы отработанного трансформаторного масла кардинально отличаются от хроматограммы нового, несмотря на характерную схожесть в области времен удерживания от 25 до 50 мин.

Исходя из анализа данных, полученных в ходе хроматографического исследования, можно сделать вывод о том, что в хроматограмме отработанного трансформаторного масла наблюдаются преобладающие хроматографические пики в области времен удерживания легких нефтяных фракций, которые, в свою очередь, отсутствовали в новом трансформаторном масле и, вероятнее всего, были получены в результате длительного и интенсивного использования масла. Вероятно, что под длительным воздействием высокой температуры, хоть и в замкнутом контуре, длинные углеродные цепочки распались на короткие, более легкие и более летучие, а следовательно, более пожароопасные. Этим и обусловлена разница в фактических показателях температуры вспышки и температуры воспламенения почти в полтора раза.

Диэлектрическая среда для трансформаторного оборудования играет важную роль в работе всех трансформаторов. Изучив статистику по пожарам в трансформаторных подстанциях, мы понимаем актуальность проблемы.

В статье представлены результаты испытаний трансформаторного масла марки Т-750, в ходе которых было установлено критическое изменение масла в процессе интенсивной и длительной эксплуатации. Полученные результаты позволяют судить о высокой потенциальной пожарной опасности отработанного трансформаторного масла и недостатках в системе проверки наиболее важных свойств таких масел. В ходе проведения испытаний было установлено, что трансформаторное масло во время эксплуатации переходит из горючей жидкости в более пожароопасную легковоспламеняющуюся жидкость, в результате чего возникает высокий риск пожара.

Углубленные исследования методом газожидкостной хроматографии позволили определить причину критического изменения физико-химических свойств отработанного трансформаторного масла. При сравнении двух хроматограмм было установлено наличие большого количества легких компонентов в отработанном масле и полное их отсутствие в новом, что и стало причиной такого различия в показателях фактических значений температуры воспламенения и вспышки.

Анализ результатов проведенных исследований подтверждает актуальность проблемы пожароопасности трансформаторных масел. Для недопущения увеличения количества пожаров на трансформаторных подстанциях необходимо более тщательно следить за состоянием и сроком замены трансформаторного масла, а также рассмотреть возможность изменения законодательства, касающегося отбора проб и анализа пожароопасных свойств отработанных трансформаторных масел. Одним из путей решения данной проблемы является применение в качестве диэлектрической среды трансформаторного масла «MIDEL» с температурой воспламенения и вспышки более 300 °С [10].

## Список источников

1. Shen, Z., Wang, F., Wang, Z., & Li, J. (2021). A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110783, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110783>.
2. ГОСТ 982–80 Масла трансформаторные. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 6 с. – Текст : непосредственный.
3. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. Статистика пожаров и их последствий : информационно-аналитический сборник / А. А. Козлов, П. В. Полехин, М. В. Шевцов [и др.]. – Балашиха : Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, 2025. – 112 с. – Текст : непосредственный. – EDN P1KMXJ.
4. Srivastava, M., Goyal, S. K., & Saraswat, A. (2021). Ester oil as an alternative to mineral transformer insulating liquid. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2850–2854, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.066>.
5. ГОСТ Р 54331–2011 Жидкости для применения в электротехнике. Неиспользованные нефтяные изоляционные масла для трансформаторов и выключателей. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 25 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ 12.1.044–2018 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 221 с. – Текст : непосредственный.
7. Монахов, В. Т. Показатели пожарной опасности веществ. Анализ и предсказание / В. Т. Монахов. – Москва : Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, 2007. – 108 с. – Текст : непосредственный.
8. Хроматограф «Кристаллюкс-400М». Руководство по эксплуатации МКУБ.415338.001 РЭ. – Йошкар-Ола : ООО НПФ «Мета-хром», 2002. – 58 с. – Текст : непосредственный.

9. Чешко, И. Д. Обнаружение и установление состава легковоспламеняющихся и горючих жидкостей при поджогах / И. Д. Чешко, М. Ю. Принцева, Л. А. Яценко. – Москва : Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, 2010. – 90 с. – Текст : непосредственный.

10. MIDE Selection Guide. The World's Leading Brand of Ester Transformer Fluids. – Текст : электронный. – URL: <https://mv-lub.com/wp-content/uploads/2023/05/MIDEL-Selection-Guide.pdf> (дата обращения: 21.09.2025).

## References

1. Shen, Z., Wang, F., Wang, Z., & Li, J. (2021). A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110783, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110783>.

2. GOST 982–80. Transformer oils. Technical specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 6 p. (In Russian).

3. Kozlov A.A., Polekhin P.V., Shevtsov M.V., Goncharenko V.S., Sibirko V.I., Chechetina T.A., Nadtochiĭ O.V., Matiushin Yu.A. *Pozhary i pozharnaia bezopasnost' v 2024 godu. Statistika pozharov i ikh posledstviĭ: informatsionno-analiticheskiĭ sbornik* [Fires and fire safety in 2024. Statistics of fires and their consequences: information and analytical collection]. Balashikha, All-Russian Order of the Badge of Honor Scientific Research Institute of Fire Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2025, 112 p. EDN PIKMXJ. (In Russian).

4. Srivastava, M., Goyal, S. K., & Saraswat, A. (2021). Ester oil as an alternative to mineral transformer insulating liquid. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2850–2854, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.066>.

5. National Standard 54331–2011. Liquids for use in electrical engineering. Unused petroleum insulating oils for transformers and circuit breakers. Technical specifications. Moscow, Standardinform Publ., 2011. 25 p. (In Russian).

6. GOST 12.1.044–2018. Occupational Safety Standards System (OSS). Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination. Moscow, Standardinform Publ., 2018. 221 p. (In Russian).

7. Monakhov V.T. *Pokazateli pozharnoi opasnosti veshchestv. Analiz i predskazanie* [Indicators of fire hazard of substances. Analysis and prediction]. Moscow, All-Russian Order of the Badge of Honor Scientific Research Institute of Fire Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2007, 108 p. (In Russian).

8. *Khromatograf Kristalliuks-400M. Rukovodstvo po ėkspluatatsii MKUB.415338.001 RĒ* [The Crystallux-400M chromatograph. Operating manual MKUB.415338.001 RE]. Yoshkar-Ola, LLC NPF "Meta-chrome" Publ., 2002, 58 p. (In Russian).

9. Cheshko I.D., Printseva M.Yu., Yatsenko L.A. *Obnaruzhenie i ustanovlenie sostava legkovosplameniائيushchikhsia i goriuchikh zhidkosteĭ pri podzhogakh* [Detection and determination of the composition of flammable and combustible liquids during arson]. Moscow, All-Russian Order of the Badge of Honor Scientific Research Institute of Fire Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2010, 90 p. (In Russian).

10. MIDE Selection Guide. The World's Leading Brand of Ester Transformer Fluids. Available at: <https://mv-lub.com/wp-content/uploads/2023/05/MIDEL-Selection-Guide.pdf> (accessed 21.09.2025).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Синицин Владислав Игоревич

Сибирский государственный университет водного транспорта (СГУВТ).

Щетинкина ул., д. 33, г. Новосибирск, 630099, Российская Федерация.

Аспирант кафедры электрооборудования и автоматики

Тел.: +7 (913) 893-01-29.

E-mail: v.i.sinitin@nsawt.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Sinitin Vladislav Igorevich

Siberian State University of Water Transport (SSUWT).

33, Shchetinkina st., Novosibirsk, 630099, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department of electrical equipment and automation, SSUWT.

Phone: +7 (913) 893-01-29.

E-mail: v.i.sinitin@nsawt.ru.

## Цыганков Михаил Сергеевич

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.

Московский проспект, д. 149, г. Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация.

Адъюнкт, старший эксперт сектора судебных экспертиз ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Новосибирской области.

Тел.: +7 (911) 903-96-58.

E-mail: 33mixon33@mail.ru

## Tsygankov Mikhail Sergeevich

Saint Petersburg university of the Ministry of Emergency Situations of Russia.

149, Moscow av., Saint Petersburg, 196105, the Russian Federation.

Adjunct, senior expert of the forensic expertise sector of the Federal State Budgetary Institution SEU FPS IPL in the Novosibirsk region.

Phone: +7 (911) 903-96-58.

E-mail: 33mixon33@mail.ru

## Палагушкин Борис Владимирович

Сибирский государственный университет водного транспорта (СГУВТ).

Щетинкина ул., д. 33, г. Новосибирск, 630099, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования и автоматики, СГУВТ.

Тел.: +7 (960) 782-44-47.

E-mail: b.v.palagushkin@nsawt.ru

## Palagushkin Boris Vladimirovich

Siberian State University of Water Transport (SSUWT).

33, Shchetinkina st., Novosibirsk, 630099, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department of electrical equipment and automation, SSUWT.

Phone: +7 (960) 782-44-47.

E-mail: b.v.palagushkin@nsawt.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Синицин, В. И. Пожарная опасность диэлектрической среды трансформатора / В. И. Синицин, М. С. Цыганков, Б. В. Палагушкин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 106 – 116.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sinitin V.I., Tsygankov M.S., Palagushkin B.V. Fire hazard of the transformer dielectric medium. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 106-116. (In Russian).

УДК 621.314

## И. И. Плотников, А. Н. Горский

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

## ИСКАЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЕГО УМЕНЬШЕНИЮ

**Аннотация.** Актуальным является вопрос проектирования устройств с оптимальными характеристиками преобразования электрического сигнала и его формы без искажения при разработке устройства с малыми габаритами для электроподвижного состава. В данной статье рассмотрено влияние параметров трансформатора на форму передачи напряжения и даны рекомендации по выбору значений этих параметров. Это касается импульсных, дифференциальных трансформаторов и трансформаторов малой мощности. Проработка данного вопроса идет в направлении от теории к конструктивному расчету. В эпоху проектирования цифровых двойников расчетная математическая модель трансформатора позволит получить быстрое принятие решения о соответствии заложенных требований к изделию. Являясь универсальной, предлагаемая модель позволяет выполнять расчеты для любого импульсного трансформатора при условии задания соответствующих исходных данных и позволит уже на этапе проектирования получить оценочную характеристику трансформатора. Исследование показало зависимость между конструкцией трансформатора, используемыми материалами для магнитопровода и формой выходного сигнала. Очевидно, что индуктивность рассеивания и емкость обмоток являются основными параметрами, которые вносят искажения в сигнал. Моделирование конструкции обмоток, подбор магнитных сплавов или ферритов способствуют уменьшению вихревых токов в магнитопроводе, что позволяет улучшить характеристики выходного сигнала и снизить влияние постоянной составляющей тока в конце импульса. Модель трансформатора с уменьшенными габаритами сердечника из стали с меньшей толщиной проката и однородной доменной структурой, а также использование распределенной обмотки по сердечнику, которая имеет минимальную собственную емкость, получила наименьшее влияние на выходной сигнал с допустимым искажением сигнала 3 %. Полученная модель трансформатора может использоваться для создания готового изделия.

**Ключевые слова:** импульсный трансформатор, коэффициент передачи, нелинейные искажения, диапазоны низких, средних и высоких частот, индуктивность рассеяния, собственная емкость, индуктивность намагничивания.

Igor I. Plotnikov, Anatoly N. Gorsky

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), St. Petersburg, the Russian Federation

## VOLTAGE DISTORTION AT THE OUTPUT OF PULSE TRANSFORMERS AND RECOMMENDATIONS FOR ITS REDUCTION

**Abstract.** The issue of designing devices with optimal characteristics of converting an electrical signal and its shape without distortion is relevant when developing a device with small dimensions for electric rolling stock. In this article, the influence of transformer parameters on the form of voltage transmission is considered and recommendations are given on the choice of values of these parameters. This applies to pulse, differential, and low-power transformers. The study of this issue is moving from theory to constructive calculation. In the era of digital twin design, the computational mathematical model of the transformer will allow for a quick decision on compliance with the inherent requirements for the product. Being universal, the proposed model allows performing calculations for any pulse transformer, provided that the appropriate initial data is specified and will allow obtaining an estimated characteristic of the transformer already at the design stage. The study showed the relationship between the transformer design, the materials used for the magnetic circuit and the shape of the output signal. Obviously, the dissipation inductance and the capacitance of the windings are the main parameters that introduce distortion into the signal. Modeling of the winding design and the selection of magnetic alloys or ferrites help to reduce eddy currents in the magnetic circuit, which improves the characteristics of the output signal and reduces the effect of the constant component of the current at the end of the pulse. A transformer model with reduced core dimensions made of steel with a smaller rolled thickness and a homogeneous domain structure, as well as the use of a distributed winding along the core, which has a minimum intrinsic capacitance, had the least effect on the output signal with an acceptable signal distortion of 3 %. The resulting transformer model can be used to create a finished product..

**Keywords:** pulse transformer, transmission coefficient, nonlinear distortion, low frequency, medium frequency and high frequency ranges, scattering inductance, intrinsic capacitance, magnetization inductance.

Одна из важнейших задач, стоящих перед проектировщиками нового электроподвижного состава (ЭПС) – уменьшение массы изделия. Компактные приборы и устройства позволяют увеличить размер полезного пространства. Для электропитания оборудования пассажирского электропоезда ЭС104 «Финист» потребовалось разработать более компактный щит собственных нужд (ЩСН), для чего необходимо установить понижающий импульсный трансформатор (ТР) (рисунок 1), однако его размеры и вес будут меньше, чем у прямого иностранного аналога ЭПС «Ласточка» компании Siemens Desiro. Данный трансформатор будет питать вспомогательные системы ЭПС, такие как электродвигатели и нагревательные элементы освещения, режим работы которых постоянно меняется.

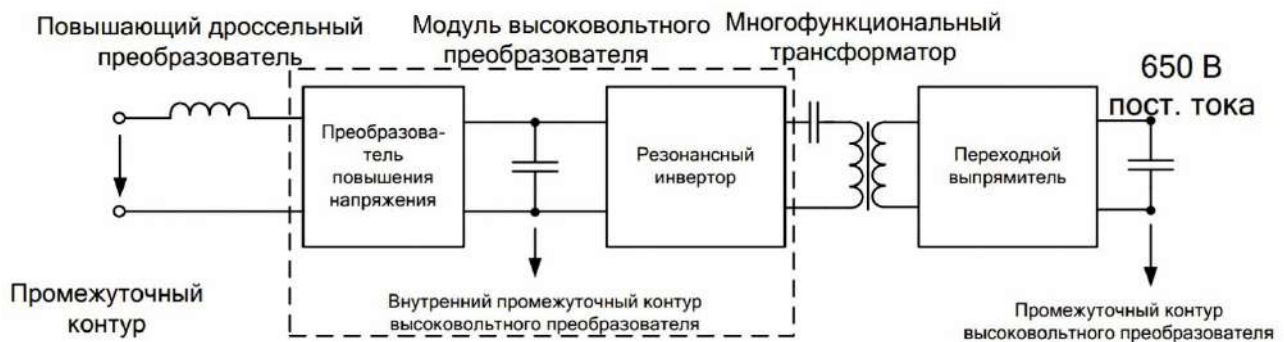


Рисунок 1 – Схема преобразователя ЩСН

Импульсные трансформаторы применяются для работы с импульсными напряжениями и токами (сигналы), имеющими малую продолжительность и крутой фронт. Импульсные трансформаторы играют важную роль в преобразовании и трансформации энергии в совре-

менных импульсных схемах. Они обеспечивают повышение или понижение напряжения, согласование нагрузки, изменение фазы сигналов, изоляцию цепей питания и генерацию коротких импульсов. Эти функции позволяют эффективно управлять электрической энергией и обеспечивают надежную работу цифровой и аналоговой электроники [1].

Поэтому основной поставленной задачей было определить необходимые условия для разработки ТР с наименьшими искажениями в полосе пропускания частот при минимальных габаритах ТР (многофункциональный трансформатор ШСН) [8].

Основным требованием, предъявляемым к передаче сигнала через трансформатор, является передача формы сигнала без искажения (рисунок 2). Искажения импульсов обычно определяются индуктивностью рассеивания и емкостями обмоток (рисунок 3, а) [2].

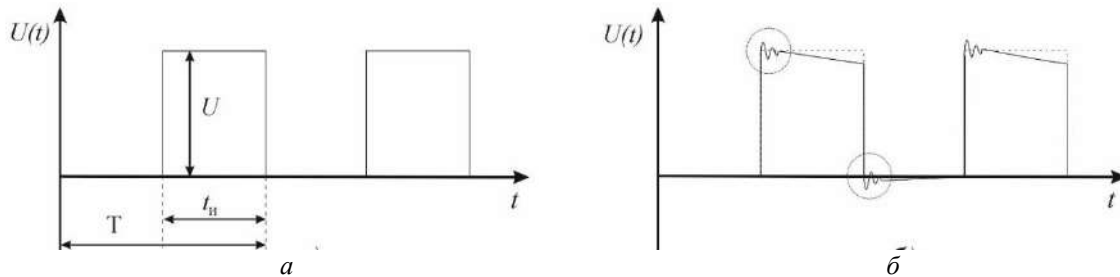


Рисунок 2 – Основные параметры электрических импульсов: а – меандр; б – искаженная форма выходного сигнала

Основные параметры электрических импульсов:  $U$  – амплитуда сигнала;  $t_n$  – длительность импульса;  $T$  – период;  $S$  – скважность,  $S = T / t_n$ .

Потери в импульсных трансформаторах в основном определяются вихревыми токами и потерями на гистерезис. Наряду с индуктивностью рассеивания и емкостями указанные потери могут вызвать дополнительные искажения сигналов. Рассмотрим влияние вихревых токов на искажения сигнала.

Поперечные сечения листов трансформаторного железа действуют как короткозамкнутые витки. В них образуются вихревые токи, создающие размагничивающий поток. Число контуров вихревых токов, охватывающих точку, расположенную внутри железного листа, увеличивается по мере приближения к центру листа. Чем ближе к центру расположена точка, тем сильнее сказывается размагничивающее действие вихревых токов и тем меньше напряженность магнитного поля [3].

При расчете трансформаторов рассматривается среднее значение напряженности магнитного поля по всему сечению листа.

В этом случае размагничивающее действие вихревых токов, распределенных по сечениям листов, можно заменить размагничивающим действием токов, протекающих в дополнительных обмотках. При этом полная эквивалентная схема дополняется ветвью ( $L_B - R_B$ ), учитывающей действие вихревых токов в сердечнике (рисунок 3, б). Индуктивность  $L_B$  обычно очень мала. Сопротивление  $R_B$  учитывает потери энергии на вихревые токи.

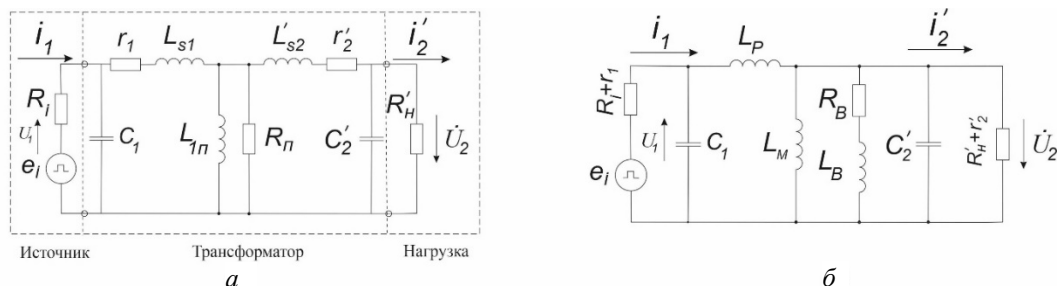


Рисунок 3 – Полная эквивалентная схема трансформатора с учетом параметров источника и нагрузки (а) и полная эквивалентная схема трансформатора с учетом вихревых токов в сердечнике (б)

Составим уравнения, которые описывают полную эквивалентную схему трансформатора (см. рисунок 3, а). В данной схеме не учтены все потери в магнитопроводе (потери на вихревые токи, магнитовязкость сердечника, магнитная проницаемость материала сердечника). Значения  $r_1, r_2'$  учитывают мощность потерь в проводах обмоток и скин-эффект [4].

Составим уравнения приведенного трансформатора:

$$\begin{cases} u_1 = r_1 i_1 + (L_1 - nM) \frac{di_1}{dt} + nM (i_1 - i_2'); \\ 0 = r_2' i_2' + (L_2' - nM) \frac{di_2'}{dt} + nM (i_2' - i_1) + u_2', \end{cases} \quad (1)$$

где  $L_1 - nM = L_{s1}$  – индуктивность рассеяния первичной обмотки;

$L_2' - nM = L_{s2}$  – индуктивность рассеяния вторичной обмотки приведенного трансформатора;

$L_s = L_{s1} + L_{s2}$  – полная индуктивность рассеяния;

$nM = L_{1n} = L_1 - L_{s1}$  – индуктивность намагничивания.

Особое внимание нужно уделить электромагнитным процессам в трансформаторе, а именно индуктивностям рассеяния и вихревым токам (см. рисунок 3, б), которые не связаны с изменением проницаемости. Однако при изменении проницаемости материала сердечника и связанного с этим коэффициента связи изменится коэффициент приведения, но на данном этапе расчета в импульсном трансформаторе это не приведет к заметной погрешности результата расчета. Тогда эти влияния как энергетические процессы примут вид:

$$p_1 = r_1' i_1'^2 + r_2' i_2'^2 + p_2 + \frac{dW_M}{dt}; \quad (2)$$

$$W_M = L_1 \frac{di_2'}{dt} + \frac{L_1}{n} i_1 i_2', \quad (3)$$

где  $n = \frac{w_1}{w_2}$  – коэффициент трансформации;

$W_M$  – энергия магнитного поля, запасаемая в любой момент времени в обмотках трансформатора.

Рассмотрим искажения формы сигнала, заведомо зная, что ЭДС источника напряжения характеризуется как импульсный периодический биполярный сигнал со скважностью импульсов  $u_1(t)$  (рисунок 2, б). Тогда входящий сигнал в ТР можно представить рядом Фурье:

$$u_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \begin{pmatrix} \sin n \omega t \\ \cos n \omega t \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Трансформатор рассматривается как линейная система, поэтому напряжение на выходе  $u_2(t)$  (согласно уравнению Максвелла) можем представить как суперпозицию действия отдельных составляющих  $u_1(t)$ :

$$u_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \begin{pmatrix} \sin n \omega t \\ \cos n \omega t \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Если постоянные  $A_n$  и  $B_n$  пропорциональны друг другу с коэффициентом  $K = \text{const}$ , то это означает, что входное и выходное напряжения трансформатора будут подобными сигналами, умноженными на постоянный коэффициент, т. е.  $B_n = KA_n$ . Это может обеспечить передачу сигнала с минимальными искажениями и сохранением формы входного сигнала. Однако в реальных условиях всегда важно учитывать частотные характеристики трансформатора и применять его в диапазоне частот, для которого он оптимален. Также возможны специальные



методы и схемы коррекции для компенсации частотных искажений и обеспечения качественной передачи сигнала.

При анализе коэффициента передачи трансформатора можно увидеть, что на диапазонах низких и высоких частот коэффициент  $K$  остается практически постоянным. Границы этих частотных диапазонов могут быть установлены с использованием неравенств [5]

$$\frac{0,8R'_H}{L_1} \leq f \leq \begin{pmatrix} 3,2 \cdot 10^{-2} & R'_H / L_S \\ 3,2 \cdot 10^{-2} & / R'_H C'_0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Искомая частота  $f$  должна удовлетворять обоим условиям (по индуктивности рассеяния  $L_S$  и емкости  $C'_0$ ) (6). Это позволяет определить точную частоту, до которой трансформатор может обеспечивать стабильный коэффициент передачи. Понимание этих факторов важно для правильной работы и настройки трансформатора в заданных частотных пределах.

Поскольку рассматриваются реально используемые формы напряжения, разложенные в ряд Фурье, в заданных частотных пределах выходного сигнала важно учитывать убывание амплитуд  $n$  высших гармоник с увеличением их порядка. Для передачи большего количества гармоник с более высокими амплитудами целесообразно использовать трансформаторы с широким частотным диапазоном (6), что позволит сохранить форму кривой напряжения на выходе более точной и близкой к форме входного сигнала. Хорошо спроектированный трансформатор соответствует требованиям по минимизации искажений передаваемого сигнала, что важно для эффективной передачи и обработки сигналов в целом, а коэффициент искажений, представляющий собой отношение действующего значения первой гармоники к действующему значению всей кривой,

$$K_d = U_2 \left( \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Зная коэффициент передачи трансформатора (для диапазона (6) он равен единице), нетрудно определить  $K_d$  для входного ( $d.in$ ) и выходного ( $d.out$ ) напряжений:

$$K_{d.in} = \frac{U_{1.in}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} U_{i.in}^2}}; \quad (8.1)$$

$$K_{d.out} = \frac{U_{1.in}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} U_{i.out}^2}}. \quad (8.2)$$

Поскольку постоянная составляющая входного сигнала не проходит через ТР, она не учитывается в выражениях, определяющих  $K_{d.in}$  и  $K_{d.out}$ .

Для определения эффективных значений несинусоидального периодического сигнала можно использовать формулу [5]:

$$A_{ef} = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_m^2}, \quad (9)$$

где  $U_m$  – эффективное значение за время действия импульса  $t_{im}$ ,  $0 \leq t \leq t_{im}$ .

Тогда эффективное значение  $A_{ef}$  за период  $T$  можно определить по уравнению:

$$A_{ef} = U_2 \sqrt{\frac{t_{im}}{T}}. \quad (10)$$

Таким образом, при передаче несинусоидальных сигналов важно минимизировать паразитные параметры трансформатора: индуктивность рассеяния  $L_S$  и эквивалентную

емкость  $C'_0 = C_1 + C_2$ . Величина емкости  $C'$  имеет существенное значение при определении искажения передаваемого сигнала через ТР, а возможность получения необходимых значений индуктивности рассеяния  $L_s$  является первостепенной задачей проектирования обмотки ТР.

Часто приходится проводить расчеты в несколько этапов, используя итерационный процесс, чтобы достичь необходимых значений индуктивности рассеяния и эквивалентной емкости.

Процедура расчета трансформаторов рассматриваемого типа, как описано, действительно имеет важное значение для обеспечения правильной передачи сигнала и минимизации искажений. Нахождение индуктивности  $L_s$  и емкости  $C'_0$  исходя из требуемого диапазона частот с коэффициентом передачи, равным 1, является ключевым шагом расчета. Также важно определение числа гармоник кривой напряжения в ряде Фурье.

Вычисление коэффициента передачи на заданной частоте  $f > f_B$  и сравнение  $K_{d.in}$  с  $K_{d.out}$  являются критическими этапами в процессе обеспечения согласованности сигнала. Практика показывает, что при различии  $K_{d.in}$  и  $K_{d.out}$  на уровне 1 – 2 % и менее передача импульса первичного напряжения во вторичную цепь происходит практически без искажения формы передаваемого тока. Это свидетельствует о правильном подборе параметров трансформатора и его значимом влиянии на качество передачи сигнала [5].

Для реализации поставленной задачи по созданию компактного трансформатора в ЩСН электровоза ЭС104 «Финист» используем предлагаемый в статье метод расчета и определим пригодность расчетного трансформатора к эксплуатации.

Расчетный трансформатор имеет следующие значения паразитных параметров:  $C'_0 = 2 \cdot 10^{-9}$  Ф,  $L_s = 10,17 \cdot 10^{-3}$  Гн. Напряжение характеризуется параметрами:  $u_1 = 1150$  В,  $u_2 = 650$  В обмоточный провод лицендратного типа; форма – меандр;  $f_{ном} = 14 \cdot 10^3$ ;  $R'_H = 4,5$  кОм.

1. Раскладываем питающее напряжение (рисунок 2, а) в ряд Фурье:

$$u(t) = U_m \left[ \frac{t_{im}}{T} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\omega t}{2} \cos \omega t \right]. \quad (11)$$

2. Верхнее значение частоты, при которой можно ожидать, что  $K = 1$ , определяем так

$$f_{up} = \begin{cases} 3,2 \cdot 10^{-2} & R'_H / L_s = 14160; \\ 3,2 \cdot 10^{-2} & / R'_H C'_0 = 80 \cdot 10^3. \end{cases} \quad (12)$$

Следовательно,  $f_{up} = 14\ 160$  Гц и определяется значением  $L_s$ . В этот диапазон входят две первые гармоники ( $n = 1, 3$ ). При этом  $f_0 = [2\pi\sqrt{L_s C'_0}]^{-1} = 5 \cdot 10^4$  Гц.

3. Определим коэффициент передачи  $K_n$  для гармоник, номера которых начинаются с пятой:  $n_5 = 0,95$ ;  $n_7 = 0,92$ ;  $n_9 = 0,87$ ;  $n_{11} = 0,82$ .

4. Значения  $K_d$  на входе и выходе трансформатора должны быть такими:

$$K_{d.in} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,90; \quad (13)$$

$$K_{d.out} = \left[ 1 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{0,95}{5}\right)^2 + \left(\frac{0,92}{7}\right)^2 + \dots \right] = 0,926. \quad (14)$$

Для получения лучших результатов и минимизации искажений вторичного напряжения важно подобрать трансформатор с меньшими значениями индуктивности  $L_s$  и емкости  $C'_0$ , это поможет уменьшить различия между входным  $K_{d.in}$  и выходным  $K_{d.out}$  коэффициентами трансформатора примерно на 3 %. Подбор трансформатора с оптимальными параметрами позволит улучшить качество передачи сигнала, снизить искажения импульсов и повысить эффективность работы устройства [6]. Внимательный подбор компонентов и учет паразитных

параметров играют значительную роль в обеспечении стабильной работы трансформатора и качественной передачи электрических сигналов (рисунок 4) [7].

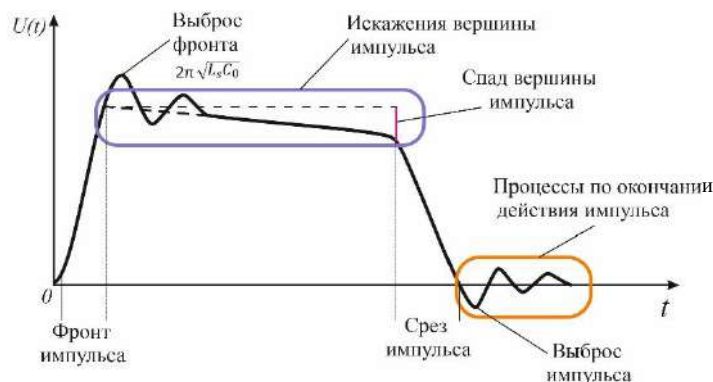


Рисунок 4 – Реальный прямоугольный импульсный сигнал

Решение задачи искажения напряжения на выходе ТР. Математический аппарат позволяет получить результат пригодности импульсного ТР на этапе разработки его модели, что в свою очередь позволяет вносить изменения в модель до момента сборки опытного образца и его испытания. Данная модель показала, что рассчитываемый ТР пригоден для установки в ЩСН, и его характеристики оптимальны для поставленной задачи.

Для уменьшения искажений передаваемого сигнала несинусоидальной формы необходимо стремиться к уменьшению параметров, приводящих к искажениям: индуктивности рассеяния, емкостей обмоток, уменьшению вихревых токов в магнитопроводе [9]. Поэтому на этапе разработки ТР необходимо подобрать, из каких специальных магнитных сплавов, ферритов и магнитодиэлектриков, обмоток нужной конструкции будет выполнен ТР. Уменьшение габаритов сердечника и числа витков обмоток способствует оптимизации работы трансформатора и повышению его эффективности. Такие меры позволяют значительно улучшить качество передаваемого сигнала и минимизировать искажения.

Трансформатор ЩСН ЭС104 «Финист» на этапе расчета зарекомендовал себя как пригодное изделие для дальнейшей реализации проекта. Поэтому нами было принято решение о дальнейшем предложении компаниям-производителям создать готовый продукт и выпустить его на рынок, так как ТР имеет все необходимые качества для реализации серийного производства.

### Список литературы

1. Ицхоки, Я. С. Импульсные устройства / Я. С. Ицхоки. – Москва : Дрофа, 2010. – 269 с. – Текст : непосредственный.
2. Светлаков, В. А. Современные методы повышения КПД импульсных источников вторичного электропитания / В. А. Светлаков, И. Г. Пронькин, С. В. Фокин. – Текст : непосредственный // Ракетно-космическая техника. – 2012. – Т. 1. – № 1(1). – С. 8. – EDN YOUBSK.
3. Кремнев, В. В. Компьютерное моделирование работы генераторов с использованием импульсного трансформатора с комбинированным сердечником / В. В. Кремнев. – Томск : Томский ун-т, 1999. – 30 с. – Текст : непосредственный.
4. Gorsky, A. N., & Plotnikov, I. I. (2023). Conditions for distortion-free voltage transfer in the transformer. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 460, p. 06037). EDP Sciences, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346006037>.
5. Горский, А. Н. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А. Н. Горский, Ю. С. Русин, Н. Р. Иванов, Л. А. Сергеева. – Москва : Радио и связь, 1988. – 176 с. – Текст : непосредственный.
6. Фокеев, А. Е. Выбор мощности силовых трансформаторов для подстанций напряжением 10(6)/0,4 кВ с учетом влияния нелинейной нагрузки / А. Е. Фокеев, А. А. Атрахманов,

Р. Р. Даутов. – Текст : непосредственный // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 65–74. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-1-65-74. – EDN VWGVLD.

7. Вихорев, Н. Н. Ведомые сетью преобразователи электроэнергии / Н. Н. Вихорев, К. А. Ширшин. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2024. – 112 с. – Текст : непосредственный. – EDN XYCGHL.

8. Roginskaya, L. E., & Mednov, A. A. (2023). Challenges and Prospects of Development of Power Supply for Electrotechnological Induction–Heating Equipment. *Russian Electrical Engineering*, 94(12), 936-941, <https://doi.org/10.3103/S106837122312012X>.

9. Zacharias, P. (2022). *Magnetic Components: Basics and Applications*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37206-4>.

## References

1. Itskhoki Ya.S. *Impul'snye ustroïstva* [Pulse devices]. Moscow, Drofa Publ., 2010, 269 p. (In Russian).

2. Svetlakov V.A., Pron'kin I.G., Fokin S.V. Modern methods of increasing the efficiency of switching secondary power supplies. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika – Rocket and space technology*, 2012, vol. 1, no. 1(1), pp. 8. EDN YOUBSK. (In Russian).

3. Kremnev V.V. *Komp'yuternoe modelirovanie raboty generatorov s ispol'zovaniem impul'snogo transformatora s kombinirovannym serdechnikom* [Computer simulation of generators using a pulse transformer with a combined core]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1999, 30 p. (In Russian).

4. Gorsky, A. N., & Plotnikov, I. I. (2023). Conditions for distortion-free voltage transfer in the transformer. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 460, p. 06037). EDP Sciences, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346006037>.

5. Gorskii A.N., Rusin Yu.S., Ivanov N.R., Sergeeva L.A. *Raschet élektromagnitnykh élementov istochnikov vtorichnogo élektropitaniia* [Calculation of electromagnetic elements of secondary power sources]. Moscow, Radio and communications Publ., 1988, 176 p. (In Russian).

6. Fokeev A.E., Atrahmanov A.A., Dautov R.R. Selecting the power transformers rated for 10(6)/0.4 kV substations taking into account the influence of nonlinear load. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 65-74. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-1-65-74>. EDN VWGVLD. (In Russian).

7. Vikhorev N.N., Shirshin K.A. *Vedomye set'iu preobrazovately élektroénergii* [Network-driven electric power converters]. Nizhniy Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev Publ., 2024, 112 p. EDN XYCGHL. (In Russian).

8. Roginskaya, L. E., & Mednov, A. A. (2023). Challenges and Prospects of Development of Power Supply for Electrotechnological Induction–Heating Equipment. *Russian Electrical Engineering*, 94(12), 936-941, <https://doi.org/10.3103/S106837122312012X>.

9. Zacharias, P. (2022). *Magnetic Components: Basics and Applications*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37206-4>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Плотников Игорь Игоревич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).  
Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики», ПГУПС.

Тел.: +7 (812) 457-81-42.

E-mail: aspplotnikov@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Plotnikov Igor Igorevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).  
9, Moscow av., Saint-Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department “Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Energy”, PGUPS.

Phone: +7 (812) 457-81-42.

E-mail: aspplotnikov@mail.ru

## Горский Анатолий Николаевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики», ПГУПС.

Тел.: +7 (812) 457-81-42.

E-mail: toe@pgups.ru

## Gorsky Anatoly Nikolaevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).

9, Moscow av., Saint-Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department “Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Energetics”, PGUPS.

Phone: +7 (812) 457-81-42.

E-mail: toe@pgups.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Плотников, И. И. Искажение напряжения на выходе импульсных трансформаторов и рекомендации по его уменьшению / И. И. Плотников, А. Н. Горский. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 116 – 124.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Plotnikov I.I, Gorsky A.N. Voltage distortion at the output of pulse transformers and recommendations for its reduction. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 116-124. (In Russian).

УДК 681.5.01-07; 550.34.012; 625.1

**Н. Г. Мудрая<sup>1</sup>, В. С. Марюхненко<sup>2</sup>, А. Ю. Мухопад<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>Военная академия ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Серпухов, Российская Федерация

## ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИКИ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ: МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ И МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ

**Аннотация.** В статье рассматривается современный метод диагностики рельсовых цепей (РЦ) с использованием широкополосных сигналов (ШПС). Актуальность исследования обусловлена существенными недостатками традиционных рельсовых цепей, такими как низкая информативность, значительная зависимость от состояния балласта и высокие эксплуатационные затраты, которые приводят к существенным экономическим потерям и рискам для безопасности движения.

Предлагаемый подход с применением ШПС позволяет осуществлять непрерывный мониторинг состояния пути в реальном времени, точно локализуя дефекты, такие как обрывы, утечки тока, ухудшение изоляции и микротрещины, что невозможно при использовании классических методов. Это не только повышает безопасность движения, но и существенно снижает количество ложных срабатываний.

В работе представлена детализированная математическая модель распространения ШПС, учитывающая ключевые факторы затухания: влияние утечек тока через балласт, шпалы и межпутевые соединения. Проведен комплексный анализ частотных характеристик сигнала, включая изучение скин-эффекта в рельсах и зависимости комплексного импеданса балласта от внешних условий, таких как влажность и температура.

Для минимизации потерь сигнала предложен комплексный подход, основанный на адаптивной оптимизации частотного диапазона и применении алгоритмов обработки данных. Центральное место в исследовании занимает принцип согласованной фильтрации, который обеспечивает максимальное отношение «сигнал/шум» на выходе фильтра благодаря эффективному сжатию сигнала и интеллектуальному подбору его параметров. Разработана и представлена структурная схема системы диагностики с подробным описанием функциональных узлов.

Результаты исследования демонстрируют, что внедрение системы контроля на основе ШПС позволяет перейти к непрерывному мониторингу состояния инфраструктуры без остановки движения, значительно повысить точность и скорость локализации дефектов. Практическая реализация разработанного метода способна существенно снизить эксплуатационные расходы и в целом повысить надежность, безопасность и пропускную способность Железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** рельсовые цепи, широкополосные сигналы (ШПС), диагностика и мониторинг, моделирование распространения сигналов, сопротивление балласта, скин-эффект, минимизация потерь, железнодорожная автоматика.

Natalia G. Mudraya<sup>1</sup>, Victor S. Maryukhnenko<sup>2</sup>, Alexander Yu. Mukhopad<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation;

<sup>2</sup>The Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great, Serpukhov (SRTMA), the Russian Federation

## EFFICIENT RAIL CIRCUITS DIAGNOSTICS TECHNOLOGIES: MODELING OF WIDEBAND SIGNAL PROPAGATION AND LOSS MINIMIZATION

**Abstract.** This article discusses a modern method for diagnosing track circuits using broadband signals. The relevance of this research stems from significant shortcomings of traditional track circuits, such as low information content, strong dependence on ballast condition, and high operating costs, which lead to significant economic losses and risks to traffic safety.

The proposed approach using broadband signals enables continuous monitoring of track conditions in real time, precisely localizing defects such as breaks, current leaks, insulation deterioration, and microcracks, which is impossible using traditional methods. This not only improves traffic safety but also significantly reduces the number of false alarms.

The paper presents a detailed mathematical model of broadband signal propagation, taking into account key attenuation factors: the effect of current leakage through ballast, sleepers, and track connections. A comprehensive analysis of the signal's frequency characteristics was conducted, including a study of the skin effect in rails and the dependence of the complex ballast impedance on external conditions such as humidity and temperature.

To minimize signal loss, a comprehensive approach based on adaptive frequency range optimization and data processing algorithms was proposed. The study focuses on the principle of matched filtering, which maximizes the signal-to-noise ratio at the filter output through effective signal compression and intelligent parameter selection. A structural diagram of the diagnostic system with a detailed description of its functional components was developed and presented.

The study results demonstrate that the implementation of a monitoring system based on broadband signals enables continuous monitoring of infrastructure conditions without interrupting service, significantly improving the accuracy and speed of defect localization. Practical implementation of the developed method can significantly reduce operating costs and improve the overall reliability, safety, and throughput of rail transport.

**Keywords:** track circuits, broadband signals (BBS), diagnostics and monitoring, signal propagation modeling, ballast resistance, skin effect, loss minimization, railway automation.

Современные железные дороги предъявляют высокие требования к безопасности, надежности и пропускной способности инфраструктуры. Рельсовые цепи (РЦ) систем сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) являются критическими элементами при контроле свободности и занятости участков пути. Через них передаются сигнальные команды и результаты диагностики состояния рельсовой линии.

Однако традиционные РЦ на постоянном или переменном токе имеют следующие недостатки:

а) низкая информативность, обусловленная лишь фиксацией, без точной локализации дефекта, факта обрыва или короткого замыкания РЦ;

б) существенная зависимость от внешних факторов, таких как сопротивление балласта, состояние изоляции, погодные условия (обледенение, загрязнение);

в) трудоемкость обслуживания – до 30 % эксплуатационных затрат устройств СЦБ приходится на диагностику и ремонт РЦ [1].

Отказы РЦ приводят к значительным экономическим потерям, включая прямые убытки (штрафы за задержки поездов, затраты на аварийный ремонт), косвенные издержки (снижение пропускной способности, ухудшение имиджа перевозчика), риски безопасности – ложные срабатывания или, наоборот, необнаруженные неисправности могут привести к аварийным ситуациям [2].

Экономические потери при отказах РЦ устройств СЦБ существенны (таблица 1).

Таблица 1 – Экономические потери при отказах РЦ на участках движения железнодорожного транспорта высокой интенсивности

№ п/п	Характер отказа	Время задержки, ч	Потери, тыс. руб.	Примечание
1	Обрыв рельсовой линии	2,5	350	Требуется ручной контроль
2	Короткое замыкание из-за загрязнения	1,8	220	Необходима очистка балласта
3	Деградация изоляции	3,2	410	Замена компонентов

По данным отчетов ОАО «РЖД» за 2022 – 2023 гг. на одной из сети железных дорог более 15 % задержек поездов связаны с неисправностями СЦБ, а средние убытки от одного отказа составляют 250 – 500 тыс. руб. в зависимости от длительности простоя и интенсивности движения на заданном участке [3].

Поэтому поиск и исследование новых, эффективных принципов построения и способов контроля работоспособности рельсовых цепей являются актуальными, и в реальных условиях они имеют практическое значение [4].

Под эффективностью РЦ понимается сокращение трудозатрат на текущую эксплуатацию и ремонт РЦ в совокупности с повышением их надежности.

В связи с этим в работе [5] предложена система контроля работоспособности рельсовых цепей с применением широкополосных сигналов.

Применение РЦ с широкополосными стимулирующими сигналами позволит осуществлять непрерывный и в реальном масштабе времени параллельный контроль сопротивления балласта и целостности рельсового пути.

Такие РЦ дают возможность локализовать неисправность рельсового пути или несоответствие техническим требованиям сопротивления балласта с точностью до контролируемого участка. РЦ с ШПС также дают возможность автоматизировать подстройки параметров сигналов устройств СЦБ в зависимости от электрических свойств балласта [2].

Благодаря высокой информативности и адаптивности ШПС можно добиться повышения безопасности движения и экономической эффективности (рисунок 1).

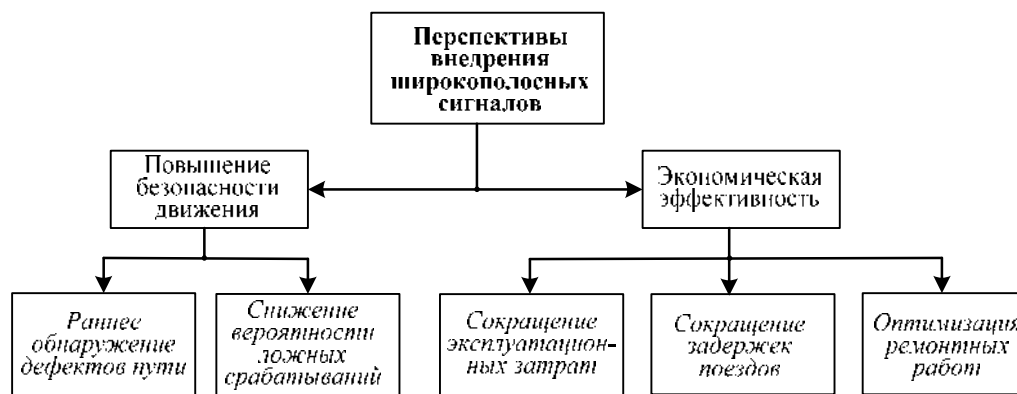


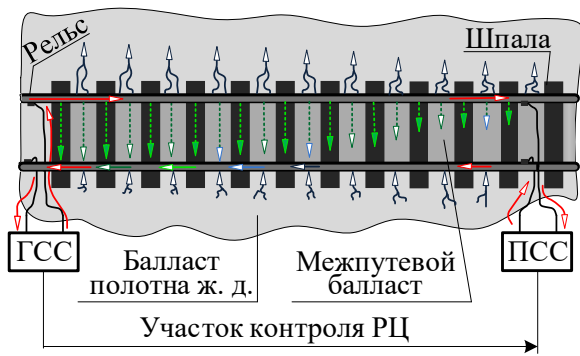
Рисунок 1 – Перспективы внедрения широкополосных сигналов

ШПС позволяют выявлять микротрещины в рельсах, ухудшение изоляции и коррозию до перехода в критическую фазу для ранних обнаружений дефектов пути, что предотвращает сходы подвижного состава. Традиционные РЦ часто фиксируют «ложную занятость» из-за плохого контакта или загрязнения, что ведет к необоснованным остановкам. Применение ШПС позволяет снизить количество ложных срабатываний. ШПС минимизируют такие ошибки за счет анализа спектра сигнала, а не только его амплитуды [6].

Автоматизированная диагностика уменьшает необходимость в обходах путей и ручных проверках, экономя до 25 % расходов на обслуживание СЦБ, что приводит к сокращению эксплуатационных затрат. Благодаря быстрой локализации неисправностей время восстановления работы пути сокращается с нескольких часов до 30 – 60 мин, что особенно критично на нагруженных участках, снижая тем самым задержки поездов. Также прогнозный анализ износа рельсов и балласта позволяет планировать превентивный ремонт, избегая аварийных простоев, что оптимизирует ремонтные работы [6].

Применение широкополосных сигналов в рельсовых цепях открывает новые возможности для качественного скачка в работе железнодорожной инфраструктуры.

Цель данной статьи: разработка математической модели распространения ШПС в рельсовых цепях, анализ факторов, влияющих на затухание сигнала, и предложение методов снижения потерь для повышения эффективности диагностики.



Условные обозначения

	– выходной ток ГСС и входной ток ПСС
Токи утечки между рельсами:	
	– через балласт полотна
	– через шпалы
	– через межпутевой балласт

Рисунок 2 – Модель распространения широкополосного стимулирующего сигнала вдоль участка контроля рельсовой цепи

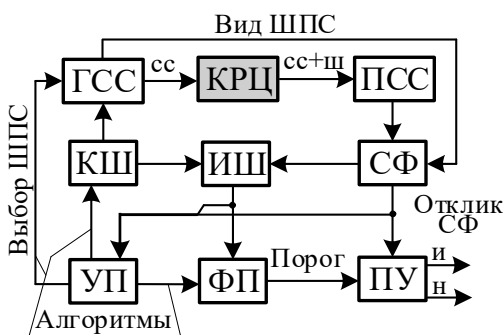


Рисунок 3 – Структурная схема системы участка КРЦ: ГСС – генератор стимулирующих сигналов; ПСС – приемник стимулирующих сигналов; СФ – согласованный фильтр; ИШ – интегратор шумов; КШ – коммутатор шумов; ФП – формирователь порога; УП – управляющий процессор; ПУ – пороговое устройство

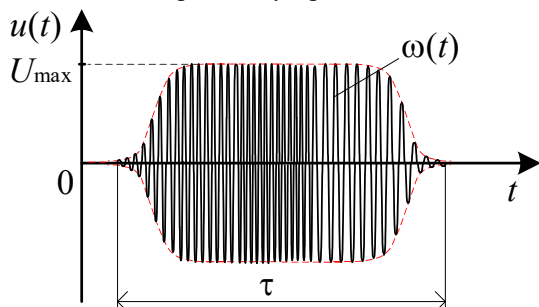


Рисунок 4 – Общий вид одиночного стимулирующего импульсного сигнала

импульса, соответствующая условиям модуляции спектра стимулирующего сигнала, так что

$$f_{\min} \leq f(t+nT) \leq f_{\max}; \quad (f_{\max} - f_{\min}) = F, \quad (2)$$

где  $F$  – ширина спектра стимулирующего сигнала.

## 1. Модель контроля рельсовой цепи широкополосными сигналами.

### Структура контроля РЦ с оптимальной обработкой стимулирующего сигнала.

Система контроля работоспособности участка рельсовой цепи с применением широкополосной системы контроля целостности состоит из трех основных функциональных элементов (рисунок 2):

1) рельсовой линии, которая одновременно является контролируемым элементом и выступает в роли линии передачи сигнала;

2) генератора стимулирующих сигналов (ГСС), который формирует ШПС с заданными частотными характеристиками;

3) приемника стимулирующих сигналов (ПСС), который анализирует затухание и искажение принятого сигнала.

Контролируемый участок рельсовой цепи (КРЦ) находится под воздействием широкополосного стимулирующего импульсного радиосигнала  $u(t)$  (рисунок 3).

Данная система контроля РЦ обеспечивает генерирование ШПС, подачу их на вход РЦ, снятие стимулирующего сигнала с выхода РЦ, обработку его, оптимизацию выбора очередного стимулирующего сигнала и принятие решения о состоянии контролируемой РЦ.

### Согласованная фильтрация стимулирующего ШПС.

Конкретный широкополосный стимулирующий сигнал для КРЦ – это радиоимпульс (рисунок 4), описываемый функцией

$$u(t) = U_m(t) \cos\{[2\pi f(t+nT)](t+nT) + \phi(t+nT)\}, \quad (1)$$

где  $t$  – текущее время,  $t \in \tau$ ;

$\tau$  – длительность импульсного широкополосного стимулирующего сигнала,  $\tau < T$ ;

$T$  – период следования стимулирующих импульсов;

$n$  – номер периода следования,  $n \leq N$ , где  $N$  – количество периодов следования ШПС, достаточных для принятия решения об исправности РЦ;

$\phi(t+nT)$  – фазовый угол;

$f(t+nT)$  – частота (как функция времени) высокочастотного заполнения стимулирующего



К ШПС относятся сигналы, база которых

$$B = F\tau \gg 1, \quad (3)$$

где  $\tau$  – длительность сигнала (рисунок 5);

$F$  – активная ширина спектра сигнала (рисунок 6).

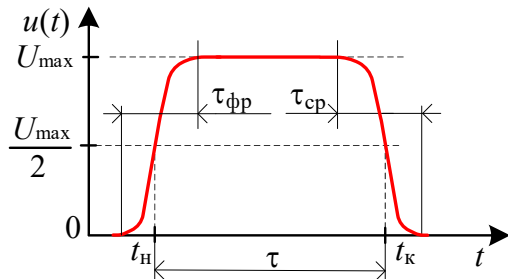


Рисунок 5 – Параметры огибающей стимулирующего импульсного сигнала

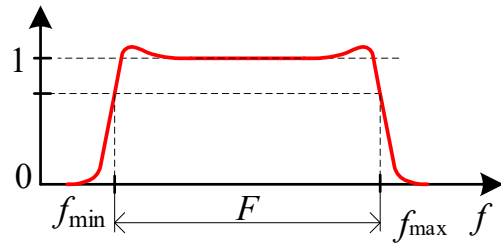


Рисунок 6 – Параметры амплитудного спектра широкополосного стимулирующего импульсного сигнала

Сигналы с ограниченной длительностью имеют спектр неограниченной протяженности. Поэтому для расчета  $B$  используется активная ширина спектра сигнала, т. е. интервал частот  $f_{\min} \leq F \leq f_{\max}$  (см. рисунок 5), ограниченный значениями нормированной амплитуды частотного спектра по уровню 0,7:

$$y(f) \leq 0,7. \quad (4)$$

Ширина амплитудного спектра  $F$  (см. рисунок 6) зависит от длительности самого импульса  $\tau$  (см. рисунок 5), его фронтов  $\tau_{\text{фр}}$  и  $\tau_{\text{ср}}$ , а также от закона внутриимпульсной модуляции.

Как правило, увеличение базы в ШПС по сравнению с простым радиоимпульсом с прямоугольной или гауссовской огибающей достигается применением модуляции по частоте или фазе в промежутке времени  $t \in \tau$ . При этом длительность импульса  $\tau$  сохраняется, а спектр сигнала  $F$  существенно расширяется.

В процессе контроля на выходе участка КРЦ формируется аддитивная смесь

$$x(t) = u_{\text{вых}}(t) + n_{\text{РЦ}}(t), \quad (5)$$

где  $n_{\text{РЦ}}(t)$  – аддитивный шум РЦ;

$$u_{\text{вых}}(t) = a(t + T_{\text{РЦ}}) \cdot u(t + T_{\text{РЦ}}) - \quad (6)$$

задержанный и искаженный по амплитуде ШПС (1) на конце контролируемого участка РЦ;

$a(t)$  – коэффициент искажения амплитуды ШПС:  $0 < a(t) < 1$ ;

$$T_{\text{РЦ}} = L_{\text{РЦ}}/c - \quad (7)$$

интервал временной задержки ШПС на длине рельсовой цепи длиной  $L_{\text{РЦ}}$ ;

$c$  – скорость распространения несущих электромагнитных колебаний широкополосного сигнала вдоль КРЦ.

В ПСС путем предварительной частотной фильтрации наблюдения  $x(t)$  (6) (рисунок 7, а) и его усиления с нормированием амплитуды (рисунок 7, б) формируется нормированное наблюдение  $x_n(t)$ , отличающееся от (5) на величину искажений, возникших в процессе передачи импульса по РЦ и при нормировании шумов:

$$x_n(t) = u_n(t) + n_{\text{РЦн}}(t) \approx x(t). \quad (8)$$

Нормирующее действие ПСС приводит к выравниванию амплитуды контрольного сигнала  $u_n(t)$  по всей длительности  $\tau$ , а также приближает распределение шума  $n_{рцн}(t)$  к нормальному.

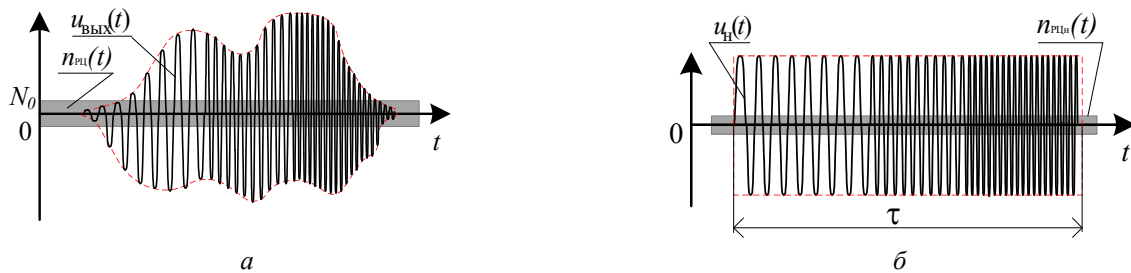


Рисунок 7 – Временные эпюры сигналов: *a* – на выходе КРЦ; *б* – на выходе ПСС

На входе СФ (см. рисунок 3) слагаемые наблюдения (8) создают отношение «сигнал/шум»  $\gamma_{вх}$ :

$$\gamma_{вх} = \frac{P_{u_n}}{P_{n_n}} = \frac{U_n^2}{\bar{U}_{n_n}^2}, \quad (9)$$

где  $P_{u_n}$  и  $P_{n_n}$  – соответственно мощность нормированного контрольного сигнала РЦ и средняя мощность шума на входе СФ;

$U_n$  – амплитуда нормированного контрольного сигнала РЦ;

$\bar{U}_{n_n}$  – средний уровень амплитуды шума на входе СФ.

Если в качестве СФ применяется линейный фильтр, то на его выходе формируются сигнал  $u_{сф}(t)$  – результат фильтрации контрольного сигнала  $u_n(t)$  и  $n_{сф\ рц}(t)$  – результат фильтрации входного шума  $n_{рцн}(t)$ .

Следовательно, на выходе формируется аддитивная смесь контрольного сигнала с выходным шумом при их отношении  $\gamma_{сф\ вых}$ :

$$\gamma_{сф\ вых} = \frac{P_{u_k}}{P_{n_{сф}}} = \frac{[u_{сф\ к}(t)]^2}{\bar{U}_{n_{сф}}^2}, \quad (10)$$

где  $P_{u_k}$  – мощность контрольного сигнала РЦ на выходе СФ;

$P_{n_{сф}}$  – дисперсия, или средняя мощность шума на выходе СФ;

$u_{сф\ к}(t)$  – контрольный сигнал РЦ на выходе СФ;

$\bar{U}_{n_{сф}}$  – средний уровень амплитуды шума на выходе СФ.

Задача обработки контрольного сигнала, полученного на выходе РЦ, – добиться максимума отношения (10). Фильтр, в котором решена задача поиска максимума, называется согласованным.

$$\gamma_{сф\ вых}^{\max} = \max \left( \frac{[u_{сф\ к}(t)]^2}{\bar{U}_{n_{сф}}^2} \right). \quad (11)$$

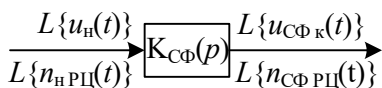


Рисунок 8 – Сигнал и шум на входе и выходе СФ в преобразованиях Лапласа

Исчерпывающей математической моделью линейного фильтра (рисунок 8) является его передаточная функция  $K_{сф}(p)$ .

При нулевых начальных условиях и в условиях линейности передаточная функция может рассматриваться отдельно по контрольному сигналу и по шуму [7]:

$$K_{сф}(p) = \frac{L\{u_{сф\ к}(t)\}}{L\{u_n(t)\}} \quad \text{или} \quad K_{сф}(p) = \frac{L\{n_{сф\ рц}(t)\}}{L\{n_{рцн}(t)\}}, \quad (12)$$

где  $L(\bullet)$  – операция преобразования Лапласа над соответствующей функцией времени;

$p = \alpha + j\omega$  – комплексная переменная,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\alpha$  и  $\omega$  – вещественные переменные.

Учитывая, что  $L\{\delta(t)\}=1$ , где  $\delta(t)$  – дельта-функция, передаточная функция СФ  $K_{\text{СФ}}(p)$  может быть также записана как преобразование Лапласа его импульсной характеристики  $h_{\text{СФ}}(t)$ :

$$K_{\text{СФ}}(p) = L\{h_{\text{СФ}}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} h_{\text{СФ}}(t)e^{-jpt} dt. \quad (13)$$

Чтобы получить мощности, необходимые для вычисления отношения (10), а также для определения условия максимума (11), воспользуемся комплексным представлением входных и выходных сигналов и шумов.

Временному входному контрольному сигналу СФ  $u_{\text{н}}(t)$  соответствует комплексный спектр

$$U_{\text{н}}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{н}}(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (14)$$

Спектр контрольного сигнала на выходе СФ

$$U_{\text{СФк}}(j\omega) = U_{\text{н}}(j\omega)K_{\text{СФ}}(j\omega), \quad (15)$$

где  $K_{\text{СФ}}(j\omega)$  – комплексный коэффициент передачи согласованного фильтра, образованный из передаточной функции  $K_{\text{СФ}}(p)$  подстановкой переменной  $p = j\omega$ .

Аддитивные составляющие выходного наблюдения СФ [8]:

а) контрольный сигнал  $u_{\text{СФк}}(t)$  определяется обратным преобразованием Лапласа выражения (15):

$$u_{\text{СФк}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{СФк}}(j\omega)e^{+j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{н}}(j\omega)K_{\text{СФ}}(j\omega)e^{j\omega t} d\omega; \quad (16)$$

б) спектральная плотность шума

$$N_{\text{СФк}}(\omega) = |N_{\text{нрц}}(j\omega)| \cdot |K_{\text{СФ}}(j\omega)|^2 = N_{\text{нрц}}(\omega) \cdot |K_{\text{СФ}}(j\omega)|^2; \quad (17)$$

в) дисперсия шума

$$\overline{U}_{\text{нСФ}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} N_{\text{нрц}}(\omega) |K_{\text{СФ}}(\omega)|^2 d\omega. \quad (18)$$

После подстановки выражений (16) и (18) в отношение  $\gamma_{\text{вых}}$  (см. формулу (10)), последнее принимает вид:

$$\gamma_{\text{вых}}(t) = \frac{|u_{\text{СФк}}(t)|^2}{\overline{U}_{\text{нСФ}}^2} = \frac{\left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{н}}(j\omega)K_{\text{СФ}}(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \right|^2}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} N_{\text{нрц}}(\omega) |K_{\text{СФ}}(\omega)|^2 d\omega} = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{н}}(j\omega)K_{\text{СФ}}(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \right|^2}{2\pi \int_{-\infty}^{\infty} N_{\text{нрц}}(\omega) |K_{\text{СФ}}(\omega)|^2 d\omega}. \quad (19)$$

Анализ выражения (19) показывает, что для поиска условий, при которых достигается максимальное значение отношения мощностей «сигнал/шум», на выходе СФ необходимо зафиксировать момент времени  $t = t_0$  и определить те параметры характеристик комплексного коэффициента передачи  $K_{\text{СФ}}(j\omega)$ , при которых достигается  $\max(\gamma_{\text{вых}})$ .

Известно, что при фиксированном  $t = t_0$  для двух непрерывных в общем случае комплексных функций  $f(\omega)$  и  $g(\omega)$  справедливо нестрогое неравенство Коши – Буняковского – Шварца [8]:

$$\frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega)g(\omega)d\omega \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |g(\omega)|^2 d\omega} \leq \int_{-\infty}^{\infty} |f(\omega)|^2 d\omega. \quad (20)$$

Предположив, что функции в соотношении (20)

$$f(\omega) = \frac{U_H(j\omega)e^{j\omega t_0}}{\sqrt{2\pi N_{\text{НРЦ}}(\omega)}}, \quad g(\omega) = \frac{K_{\text{СФк}}(j\omega)}{\sqrt{N_{\text{НРЦ}}(\omega)}}, \quad (21)$$

после их подстановки в выражение (20) получаем неравенство, актуальное для определения условий максимума (11):

$$\frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} U_H(j\omega)K_{\text{СФ}}(j\omega)e^{j\omega t_0} d\omega \right|^2}{2\pi \int_{-\infty}^{\infty} N_{\text{НРЦ}}(\omega) |K_{\text{СФ}}(\omega)|^2 d\omega} \leq \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|U_H(j\omega)|^2}{N_{\text{НРЦ}}(\omega)} d\omega = \gamma_{\text{СФвых}}^{\text{max}}. \quad (22)$$

Правая часть выражения (22) – это максимально возможное значение отношения «сигнал/шум» на выходе согласованного фильтра. Это условие достижимо лишь при условии, что в левой части уравнения (22)

$$K_{\text{СФк}}(j\omega)\sqrt{N_{\text{НРЦ}}(\omega)} = \frac{c_0 U_H(j\omega)e^{-j\omega t_0}}{\sqrt{2\pi N_{\text{НРЦ}}(\omega)}}$$

или

$$K_{\text{СФк}}(j\omega) = \frac{c U_H(j\omega)}{\sqrt{N_{\text{НРЦ}}(\omega)}} e^{-j\omega t_0}, \quad (23)$$

где  $c$  – постоянный вещественный коэффициент.

Таким образом, при соблюдении условия (23) на выходе СФ после обработки всего импульсного контрольного ШПС, т. е. для момента времени  $t_0 \geq \tau$ , формируется максимальное отношение мощности контрольного сигнала к мощности шума.

Согласованный фильтр не обладает инвариантностью к множеству фильтруемых сигналов. Он является оптимальным только к фильтрации одного сигнала.

Синтез оптимального СФ сводится к технической реализации передаточной функции, соответствующей комплексному коэффициенту передачи (23).

### Оптимизация сжатия сигнала.

Фильтрация ШПС в согласованном фильтре (см. рисунок 2) сопровождается сжатием сигнала  $u_H(t)$ . В результате фильтрации на выходе фильтра появляется отклик – сжатый сигнал в виде узкого пика длительностью на уровне 0,5, равной  $\tau_{\text{ВЫХ}}$  (рисунок 9). Качество согласованной фильтрации характеризуется коэффициентом сжатия

$$Q = \frac{\tau}{\tau_{\text{ВЫХ}}}. \quad (24)$$

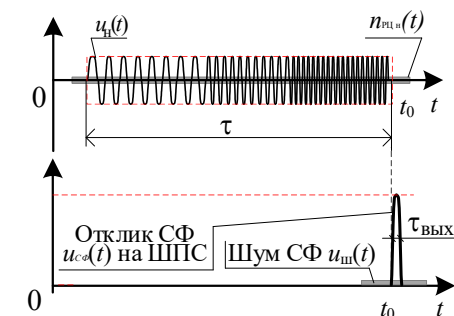


Рисунок 9 – Общий вид отклика СФ на ШПС

При фиксированной длительности ШПС (1) чем шире его спектр (2), тем короче  $\tau_{\text{ВЫХ}}$  – пик отклика СФ  $u_{\text{СФ}}(t)$  и больше его амплитуда  $U_{\text{СФ}}$ . Сжатие ШПС примерно равно базе сигнала (3)

$$Q \approx B. \quad (25)$$

С согласованного фильтра снимается два выхода (см. рисунок 2). Выход 1 – выходной шум  $u_{\text{ш}}(t)$  с полной режекцией отклика. Выход 2 – только отклик СФ  $u_{\text{СФ}}(t)$  с подавлением шума.

Выходной шум СФ  $u_{\text{ш}}(t)$  поступает на интегратор шума (ИШ) для формирования средней амплитуды шума и последующего вычисления в управляющем процессоре (УП) уровня порога.

Для формирования напряжения порога  $U_{пор}$  на  $k$ -м временном интервале, который является результатом алгоритмического решения управляющего процессора, основанного на априорном знании временной схемы работы системы, текущем состоянии канала связи (рельсовой цепи), возможности динамической адаптации под изменяющиеся условия для поддержания максимальной точности измерения,  $\tau_k \in \{t_k; t_{(k+1)}\}$  импульсной последовательности широкополосных стимулирующих сигналов выделяется интервал времени  $\tau_{ш k} \in \{t_{шн}; t_{шк}\}$  (рисунок 10). В течение промежутка времени  $\tau_{ш k}$  на выходе контролируемой РЦ существует только шум  $u_{ш k}(t)$ . В интеграторе шума (ИШ) формируется среднее напряжение шума

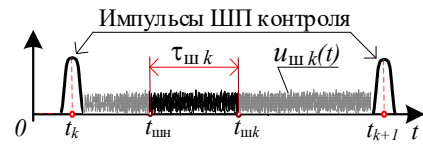


Рисунок 10 – Выделение интервала на шумовой дорожке для формирования порогового напряжения

$$\bar{U}_{ш k} = \frac{1}{\tau_{ш k}} \int_0^{\tau_{ш k}} u_{ш k}(t) dt. \quad (26)$$

Из напряжения  $\bar{U}_{ш k}$ , скорректированного согласно алгоритму работы управляющего процессора с учетом отклика  $u_{сф}(t)$ , формируется напряжение порога  $U_{пор k}(t)$ .

Отклик СФ  $u_{сф}(t)$  поступает также на управляющий процессор системы, в котором вычисляется текущее отношение «сигнал/шум» на выходе СФ.

В случае ухудшения по сравнению с потенциальным для данного ШПС текущего отношения «сигнал/шум» на выходе СФ управляющий процессор вырабатывает команду на ГСС на выбор для контроля РЦ более широкополосного стимулирующего сигнала.

Если же в управляющем процессоре конфликта между ожидаемым и текущим качеством фильтрации не выявлено, то алгоритмом дальнейшего функционирования УП передается команда-разрешение на формирователь порога (ФП). По этой команде ФП вырабатывает уровень порогового значения  $U_{пор}$ , необходимого для принятия решения о состоянии контролируемой РЦ. Пороговый уровень и отклик СФ поступают на пороговое устройство (ПУ), на выходе которого индицируется результат контроля РЦ.

Кроме того, управляющий процессор в каждом периоде контроля вырабатывает:

- а) для интегратора шумов команды сброса и начальные условия интегрирования;
- б) для коммутатора шума (КШ) команды подключения режима интегрирования и выбора стимулирующего сигнала по критерию максимума отношения «сигнал/шум» на выходе СФ.

Преимущество оптимальной обработки сигналов контроля РЦ заключается в получении максимального по сравнению с применением иных, несогласованных фильтров отношения «сигнал/шум» на выходе СФ [8]:

$$\gamma_{вых СФ} = \gamma_{вх} \sqrt{2B} \approx \gamma_{вх} \sqrt{2Q}, \quad (27)$$

где  $B$  – база сигнала;

$Q$  – коэффициент сжатия.

Контроль результата согласованной фильтрации по значению выходного отношения «сигнал/шум»  $\gamma_{вых СФ}$  путем формирования порога обнаружения по текущему среднему уровню шумов позволяет путем введения обратной связи поддерживать ширину спектра широкополосного стимулирующего сигнала так, что при изменении шумового фона на выходе РЦ значение  $\gamma_{вых СФ} = const$ .

Решению этой задачи подчинены алгоритмы функционирования управляющего процессора по выбору стимулирующего для контроля РЦ сигнала в условиях конкретного уровня шумов (рисунок 11).

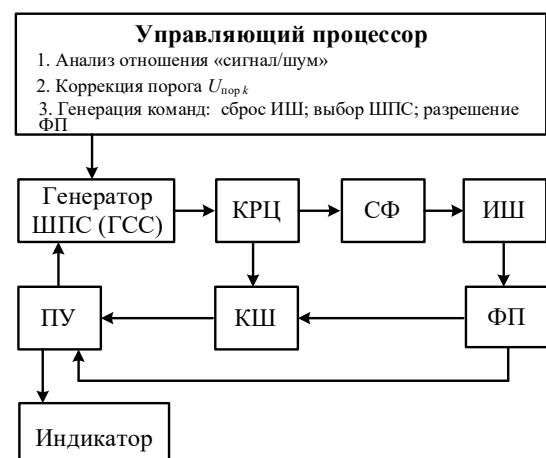


Рисунок 11 – Структурная схема процесса управления широкополосным сигналом в системе диагностики рельсовых цепей

## 2. Потери мощности в контролируемой РЦ.

Ток ШПС, поступающий на ПСС,

$$\dot{I}_{\text{вх}} = \dot{I}_{\text{вых}} - \dot{I}_{\Sigma \text{ бл}} - \dot{I}_{\Sigma \text{ ш}} - \dot{I}_{\Sigma \text{ м.б}}, \quad (28)$$

где  $\dot{I}_{\Sigma \text{ бл}}$ ,  $\dot{I}_{\Sigma \text{ ш}}$ ,  $\dot{I}_{\Sigma \text{ м.б}}$  – соответственно суммарные токи утечки через балласт, шпалы и межпутевой балласт в рельсовых линиях.

Очевидно, что суммарные токи утечки через шпалы

$$\dot{I}_{\Sigma \text{ ш}} = \sum_{n=1}^m \dot{I}_{\text{ш}}, \quad (29)$$

где  $m$  – количество шпал на контролируемом участке;  
суммарные токи утечки балласта

$$\dot{I}_{\text{бл}} = \int_0^L \dot{i}_{\text{бл}}(l) dl; \quad (30)$$

суммарные токи утечки межпутевого балласта

$$\dot{I}_{\text{м.б}} = \int_0^L \dot{i}_{\text{м.б}}(l) dl, \quad (31)$$

где  $\dot{i}_{\text{бл}}(l)$ ,  $\dot{i}_{\text{м.б}}(l)$  – законы изменения тока утечки от координаты на рельсовой линии, которые зависят от электрических свойств балласта;

$L$  – длина контролируемого участка рельсовой цепи.

Из формул (28), (29) следует, что результат приема и обработки ПСС информационных сигналов напрямую зависит от потерь, вызванных утечкой через балласт, межпутевой балласт и шпалы. Точность диагностики определяется корректностью учета всех утечек (формулы (28), (29)), а также уровнем шумов на выходе контролируемого участка РЦ.

К ключевым факторам, оказывающим влияние на  $\dot{I}_{\text{вх}}$ , относятся такие:

параметры пути – увеличение длины  $L$  повышает интегральные потери, снижение сопротивления на 30 – 50 % (например, после обильных осадков и пр.) увеличивает утечки [9 – 11];

температурные эффекты – металлические элементы (рельсы, соединители) меняют проводимость при нагреве или охлаждении [9 – 11];

частотные характеристики ШПС.

## 3. Частотные характеристики широкополосных сигналов в рельсовых цепях.

Частота используемого сигнала влияет на его распространение. Широкополосные сигналы в рельсовых цепях могут охватывать диапазон от единиц герц до десятков килогерц. Выбор частотных составляющих определяет глубину проникновения сигнала в рельсовую структуру, чувствительность к различным типам дефектов (обрывы рельсов, ухудшение изоляции балласта), уровень помехозащищенности от внешних электромагнитных наводок. На высоких частотах (выше 1 кГц) ток распространяется преимущественно в поверхностном слое рельса, так называемом скин-слое рельса [11].

Сопротивление рельса  $R_0$  увеличивается с ростом частоты из-за скин-эффекта:

$$R_0 = R_p \cdot k_{\text{скин}}, \quad (32)$$

где  $R_p$  – активное сопротивление на постоянном токе (~0,1 Ом/км);

$k_{\text{скин}}$  – коэффициент, зависящий от глубины скин-слоя  $\delta$ .

Для расчета коэффициента скин-слоя использовано упрощенное уравнение с представлением рельса в качестве круглого проводника с большим радиусом:

$$k_{\text{скин}} \approx r / 2\delta, \quad (33)$$

где  $r$  – приведенный параметр, описывающий «сечение» рельса.

Глубина проникновения  $\delta$  рассчитывается по формуле:

$$\delta(f) = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}}, \quad (34)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление рельсовой стали ( $\approx 1.37 \cdot 10^{-6}$  Ом · м);

$\mu_0$  – магнитная постоянная ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн / м);

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость ( $\sim 100$  для стали);

$f$  – частота сигнала.

Частота сигнала, распространяющегося вдоль рельсовой цепи, характеризуется уравнением

$$f(t) = f_0 + k \cdot t; \quad (35)$$

$$k = \frac{(f_1 - f_0)}{T}, \quad (36)$$

где  $f_0$  – начальная частота;  $f_1$  – конечная частота;  $T$  – длительность сигнала;  $k$  – скорость изменения частоты.

Таблица 2 – Зависимость параметров рельсовой цепи от частоты

Параметры ЛЧМ-сигнала: $f_0 = 1$ кГц, $f_1 = 100$ кГц, $T = 1$ с		Параметры рельсовой цепи	
$t$ , с	$f$ , Гц	$R_0(t)$ , Ом/км	$\delta(t)$ , мм
0	1	0,42	11,9
0,01	500	9,4	0,53
0,1	5000	29,4	0,017
0,5	25000	65,8	0,0076

Из уравнений (33) – (36) видно, что при увеличении частоты происходит уменьшение скин-слоя, что ведет к повышению сопротивления рельса и соответственно к усиленному затуханию сигнала. На низких частотах (1 Гц – 1 кГц) ток распределен по большей площади «сечения» рельса. На высоких частотах (более 10 кГц) ток вытесняется в поверхностный слой ( $\delta < 0,1$  мм). Результаты расчетов для разных частот представлены в таблице 2.

Низкочастотные составляющие (ниже 1 кГц) менее подвержены скин-эффекту, но их амплитуда и фаза зависят от удельного сопротивления балласта и влияния диэлектрической проницаемости балласта.

Ток утечки через балласт  $i_{бл}(f)$  описывается импедансом  $Z_{бл}(f)$  или  $Z_{бл}(t)$ , включающим в себя активную и емкостную составляющие:

$$Z_{бл}(f) = \frac{R_{бл} + 1}{2\pi \cdot j \cdot f \cdot C_{бл}}; \quad (37)$$

$$Z_{бл}(t) = \frac{R_{бл} + 1}{2\pi \cdot j \cdot f(t) \cdot C_{бл}}, \quad (38)$$

где  $R_{бл}$  – активное сопротивление балласта, зависящее от удельного сопротивления балласта;

$C_{бл}$  – распределенная емкость,

а также фазовым углом:

$$\varphi(t) = -\arctan(1 / 2\pi \cdot f(t) \cdot C_{бл} \cdot R_{бл}). \quad (39)$$

На основании формул (37) – (39) можно сделать вывод о том, что активная составляющая, которая и определяет ток утечки через балласт, доминирует больше в том случае, когда частота ниже. При снижении удельного сопротивления балласта [2] (например, из-за дождя и пр.), а, как следствие, при снижении  $Z_{бл}(t)$  ток  $i_{бл}(t)$  растет, что приводит к увеличению затухания

полезного сигнала. На низких частотах (1 кГц) импеданс имеет емкостной характер. На высоких частотах (более 20 кГц)  $Z_{бл} \approx R_{бл}$ , фазовый угол стремится к нулю. Результаты расчетов для разных частот представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость импеданса сопротивления балласта от частоты

Параметры ЛЧМ-сигнала: $f_0 = 1$ кГц; $f_0 = 100$ кГц; $T = 1$ с		Сухой балласт ( $R_{бл} = 100$ Ом, $C = 1$ нФ/км( $\approx const$ ))		Влажный балласт ( $R_{бл} = 10$ Ом, $C = 1$ нФ/км( $\approx const$ ))	
$t, c$	$f, кГц$	$Z_{бл}(t), Ом \cdot км$	$\varphi(t), ^\circ$	$Z_{бл}(t), Ом \cdot км$	$\varphi(t), ^\circ$
0	1	187	-58	18,7	-58
0,2	20	100,3	-4,5	10,03	-4,5
0,5	50	100,05	-1,8	10,005	-1,8
1	100	100,01	-0,9	10,001	-0,9

Передача широкополосного сигнала (совмещающего низкие и высокие частоты) вдоль рельсовой линии обеспечивает полный контроль состояния рельсов и балласта, гибкость диагностики (адаптация под погоду и тип неисправности) и повышенную помехоустойчивость [6]. Это делает ШПС оптимальным решением для непрерывного мониторинга рельсовых цепей без остановки движения.

Широкополосный сигнал позволяет исследовать рельсовую цепь в широком диапазоне частот, разделяя вклад скин-эффекта, индуктивности и балласта.

#### 4. Методы минимизации потерь сигнала.

Для повышения точности и надежности диагностики рельсовых цепей с использованием шумоподобных сигналов (ШПС) необходимо минимизировать потери сигнала, вызванные скин-эффектом и внешними помехами. В данной части рассматриваются ключевые методы оптимизации передачи и обработки сигналов.

Выбор рабочей частоты ШПС оказывает прямое влияние на глубину проникновения сигнала и его чувствительность к дефектам. При применении низкочастотного диапазона (до 1 кГц) обеспечиваются контроль состояния балласта и утечек за счет малых потерь на скин-эффект и высокая проникающая способность. Среднечастотный диапазон (1 – 10 кГц) обеспечивает обнаружение обрывов рельсов и значительных дефектов, достигая компромисса между глубиной проникновения и точностью локализации. Выявление микротрещин, коррозии и точечных повреждений достигается применением высоких частот (более 10 кГц) за счет высокой разрешающей способности, чувствительности к локальным изменениям импеданса. Высокие частоты подвержены сильному затуханию и влиянию скин-эффекта.

Динамическая подстройка частотного диапазона для минимизации потерь на основе текущего состояния рельса (сухой/влажный балласт), уровня внешних помех, требуемой точности диагностик, а также выделение полезной составляющей путем сравнения амплитуд (за счет его высокой автокорреляции) позволит снизить потери сигнала, улучшить точность измерений, обеспечить устойчивость к помехам.

Упрощенная структурная схема системы контроля работоспособности рельсовых цепей с применением широкополосных сигналов представлена на рисунке 12.

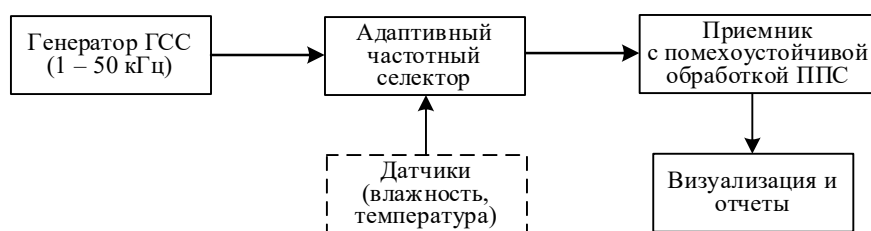


Рисунок 12 – Структурная схема системы контроля работоспособности рельсовых цепей с применением широкополосных сигналов



На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Эффективность ШПС для диагностики рельсовых цепей. Применение широкополосных сигналов позволит проводить непрерывный мониторинг состояния рельсовых цепей без остановки движения поездов, что обеспечивает высокую точность локализации дефектов, адаптивность к изменяющимся условиям (влажность, температура и пр.).

2. Ключевые факторы потерь сигнала. Скин-эффект увеличивает сопротивление рельсов на высоких частотах (более 10 кГц), снижая амплитуду сигнала; импеданс балласта зависит от влажности и загрязнения, вызывая утечки тока; частотные характеристики при низких частотах (1 – 500 Гц) эффективны для контроля балласта, а высокие (10 – 50 кГц) – для выявления микротрещин.

3. Предложены методы минимизации потерь: оптимизация частотного диапазона за счет динамического выбора частоты на основе типа дефекта и условий среды, коррекция амплитуды сигнала с учетом глубины скин-слоя, подавление помех за счет корреляции.

4. Интеграция в систему мониторинга. Предложена структурная схема системы, включающая в себя генератор ШПС с адаптивным частотным селектором и помехоустойчивый приемник с цифровой обработкой сигналов.

Разработанные подходы на основе ШПС позволят обеспечить контроль рельсовой цепи в режиме реального времени с минимальными потерями сигнала, что подтверждается математическими моделями. Проведение всесторонней количественной оценки диагностических показателей рельсовой цепи является дальнейшей задачей для практической апробации описанного метода контроля.

### *Список литературы*

1. Марюхненко, В. С. Критические и предотказные состояния на транспорте / В. С. Марюхненко, М. Г. Комогорцев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2007»: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – Одесса : Черноморье, 2007. – Т. 1. – № 4. – С. 3–4. – EDN OIULZV.

2. Марюхненко, В. С. Физико-технические аспекты изменения сопротивления балласта железнодорожных путей / В. С. Марюхненко, Н. Г. Мудрая. – Текст : непосредственный // Вопросы естествознания. – 2016. – № 1 (9). – С. 25–34. – EDN WXLRYR.

3. Предупреждение и устранение неисправностей СЦБ – Факторы, влияющие на надежность устройств в процессе эксплуатации // lokomo.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://lokom.ru/scb/preduprezhdenie-i-ustranenie-neispravnostey-scb-3.html> (дата обращения: 01.12.2025).

4. Мудрая, Н. Г. Обеспечение безопасности движения поездов с применением радиотехнических систем / Н. Г. Мудрая, Ю. Ф. Мухопад. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 6 (137). – С. 232–238. – DOI 10.21285/1814-3520-2018-6-232-238. – EDN UTKSUM.

5. Мудрая, Н. Г. Алгоритм выявления неисправности рельсовой цепи в системе контроля с применением шумоподобных сигналов / Н. Г. Мудрая, В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 2 (62). – С. 141–150. – EDN OHKKSP.

6. Мудрая, Н. Г. Применение шумоподобных сигналов для контроля сопротивления балласта железнодорожных путей / Н. Г. Мудрая, В. С. Марюхненко. – Текст : непосредственный // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. тр. всерос. науч.-практ. конф. / Сибирский федеральный университет. – Красноярск, 2015 – С. 84–87.

7. Марюхненко, В. С. Алгоритмизация первичной обработки радиосигналов / В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад. – Текст : непосредственный // Системный анализ в проектировании и управлении : труды X междунар. науч.-практ. конф. / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2006. – Часть 3. – С. 98–101.

8. Зачиняев, Ю. В. Анализ и классификация формирователей линейно-частотно-модулированных радиосигналов с точки зрения уменьшения длительности формируемых сигналов / Ю. В. Зачиняев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 118. – EDN PKWTJT.

9. Мудрая, Н. Г. Автоматическая система контроля работоспособности рельсовых цепей на основе применения широкополосных сигналов / Н. Г. Мудрая. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 1 (57). – С. 124–129. EDN YUZZIA.

10. Савушкин, С. А. Методы оценки стоимости адаптации железнодорожной инфраструктуры к изменению климата / С. А. Савушкин, В. Г. Горбунов, А. В. Лемешкова. – Текст : непосредственный // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2023. – № 2 (21). – С. 8–13. – DOI 10.47501/ITNOU.2023.2.08-13. – EDN QMSDBI.

11. Шаманов, В. И. Влияние условий эксплуатации на электрические и магнитные параметры рельсовых линий / В. И. Шаманов. – Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2025. – Т. 11. – № 2. – С. 109–119. – DOI 10.20295/2412-9186-2025-11-02-109-119. – EDN ZGSYBB.

## References

1. Maryukhnenko V.S., Komogortsev M.G. [Critical and Pre-Failure Conditions in Transport]. *Sovremennye problemy i puti ikh resheniia v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii 2007 : sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoĭ nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern problems and ways to solve them in science, transport, production and education 2007" : collection of scientific papers based on the materials of the international scientific and practical conference]. Odessa, Chernomor'e Publ., 2007, vol. 1, no. 4, pp. 3-4. EDN OIULZV. (In Russian).

2. Maryukhnenko V.S., Mydraya N.G. Physical and technical aspects resistance change of railways of ballast. *Voprosy estestvoznaniia – Questions of natural science*, 2016, no. 1(9), pp. 25-34. EDN WXLRYR. (In Russian).

3. *Preduprezhdenie i ustranenie neispravnostei StsB Faktory, vliiaushchie na nadezhnost' ustroistv v protsesse ekspluatatsii* [Prevention and troubleshooting of SCB – Factors affecting the reliability of devices during operation]. Available at: <https://lokomotiv.ru/scb/preduprezhdenie-i-ustranenie-neispravnostey-scb-3.html> (accessed 01.12.2025).

4. Mudraya N.G., Mukhopad Yu.F. Provision of rail traffic safety based on radio engineering systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2018, vol. 22, no. 6(137), pp. 232-238. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-232-238>. EDN UTKSUM. (In Russian).

5. Mudraya N.G., Maryukhnenko V.S., Mukhopad Yu.F. An algorithm of identifying faulty rail track circuit in the control system with the use of broadband signals. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2019, no. 2(62), pp. 141-150. EDN OHKKSP. (In Russian).

6. Mudraya N.G., Maryukhnenko V.S. [Application of noise-like signals to monitor track ballast resistance]. *Sovremennye problemy radioelektroniki : sbornik trudov vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern problems of radio electronics : proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2015, pp. 84-87. (In Russian).

7. Maryukhnenko V.S., Mukhopad Yu.F. [Algorithmization of primary processing of radio signals]. *Sistemnyi analiz v proektirovanii i upravlenii : trudy X mezhdunarodnoĭ nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Systems analysis in design and management: proceedings of the 10th international scientific and practical conference]. St. Petersburg, 2006, part 3, pp. 98-101. (In Russian).

8. Zachinyaev Yu.V. Analysis and classification of linear frequency modulated radio signals in reducing duration of generated signals. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia – Modern problems of science and education*, 2012, no. 5, pp. 118. EDN PKWTJT. (In Russian).

9. Mudraya N.G. Automatic control system of rail circuits rolling on the basis of application of complex signals. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, no. 1(57), pp. 124-129. EDN YUZZIA. (In Russian).

10. Savushkin S.A., Gorbunov V.G., Lemiashkova A. Cost estimation methods for adapting railway infrastructure to climate change. *ITNOU: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii – Information technologies in science, education and management*, 2023, no. 2(21), pp. 8-13. <https://doi.org/10.47501/ITNOU.2023.2.08-13>. EDN QMSDBI. (In Russian).

11. Shamanov V. Influence of operating conditions on the electrical and magnetic parameters of rails. *Avtomatika na transporte – Transport automation research*, 2025, vol. 11, no. 2, pp. 109-119. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2025-11-02-109-119>. EDN ZGSYBB. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Мудрая Наталия Георгиевна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Соискатель кафедры «Автоматизация производственных процессов», ИрГУПС.

Тел.: +7 (908) 642-16-76.

E-mail: mydrayanatali@mail.ru

### Марюхненко Виктор Сергеевич

Филиал военной академии ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого.

Бригадная ул., д. 17, Московская область, город Серпухов, 142210, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор.

Тел.: +7 (977) 171-63-99.

E-mail: viktor.maryukhnenko@yandex.ru

### Мухопад Александр Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор.

Тел.: +7 (902) 172-45-53.

E-mail: jcmg@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мудрая, Н. Г. Эффективные технологии диагностики рельсовых цепей: моделирование распространения широкополосных сигналов и минимизация потерь / Н. Г. Мудрая, В. С. Марюхненко, А. Ю. Мухопад. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 124 – 138.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Mudraya Natalia Georgievna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Candidate of the department “Automation of production processes”, ISTU.

Phone: +7 (908) 642-16-76.

E-mail: mydrayanatali@mail.ru

### Maryukhnenko Victor Sergeevich

The Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great.

Brigadnaya st., 17, Moscow region, Serpukhov city, 142210, Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor.

Phone: +7 (977) 171-63-99.

E-mail: viktor.maryukhnenko@yandex.ru

### Mukhopad Alexander Yurievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor.

Phone: +7 (902) 172-45-53.

E-mail: jcmg@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mudraya N.G., Maryukhnenko V.S., Mukhopad A.Y. Efficient rail circuits diagnostics technologies: modeling of wideband signal propagation and loss minimization. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 124-138. (In Russian).

УДК 681.51

## Н. С. Зайцев, В. А. Кубарев, Е. С. Кузнецова

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк, Российская Федерация

## КАЧЕСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОУПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ УЧЕТЕ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ МАШИНЫ

**Аннотация.** В настоящее время частотно-регулируемый синхронный электродвигатель с электромагнитным возбуждением активно применяется в высокоавтоматизированных электроприводах большой мощности (единицы и десятки МВт) различных механизмов и агрегатов, для которых ранее использовались менее надежные и требующие более тщательного обслуживания электромеханические системы постоянного тока. В то же время организация систем автоматического управления синхронных машин с помощью традиционного способа, при котором контурные регуляторы настраиваются в соответствии с принципом подчиненного регулирования, является более сложной задачей ввиду особенностей объекта управления – синхронного двигателя (в большей мере выраженной нелинейности, многомерности, трудоемкости учета насыщения магнитной системы).

Цель данной работы – сравнительный анализ переходных процессов, возникающих при работе частотно-регулируемой синхронной машины, для которой вводится учет насыщения по основному магнитному потоку –

потоку в воздушном зазоре – при регулировании ее координат за счет организации двух различных систем автоматического управления: типовой, в основе которой лежит применение полеориентированного управления по магнитному полю статора, и модернизированной, в которой закон управления магнитным полем машины изменяется в зависимости от статической нагрузки. Особое внимание в рамках данной статьи уделяется способу учета насыщения магнитной системы двигателя и построению математической и имитационной моделей, удобных для дальнейшего синтеза с системой автоуправления.

На основе указанного сравнительного анализа в статье обосновывается целесообразность синтеза более сложных систем автоуправления – систем с переменной структурой, в которых негативное влияние на качество регулирования из-за возникновения насыщения магнитной системы машины нивелируется выбором оптимального закона управления магнитным полем. Модели, представленные в статье, могут быть использованы при проектировании реальных регулируемых синхронных электроприводов, работающих в условиях высоких нагрузок.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, переменная структура, насыщение магнитной системы, полеориентированное управление, уравнения Парка – Горева, синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением, электропривод, переходные процессы, показатели качества.

**Nikita S. Zaytsev, Vasilii A. Kubarev, Elena S. Kuznetsova**

Siberian State Industrial University (SibSIU), Novokuznetsk, the Russian Federation

## THE QUALITY OF REGULATION IN THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF A SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE, TAKING INTO ACCOUNT THE SATURATION OF THE MAGNETIC SYSTEM OF THE MACHINE

**Abstract.** Nowadays a frequency-controlled externally excited synchronous motor intensively uses in highly automated high-power electric drives. Earlier there were less reliable and more carefully maintained electromechanical direct current systems in these applications. At the same time, setting up of the closed-loop automatic control systems with subordinate regulation of the synchronous machines is the more difficult task. This is because a synchronous machine is a more complex control object.

The purpose of this work is a comparative analysis of transients. In this case, saturation is taken into account according to the magnetic flux in the air gap. The coordinates of the machine are regulated by two different automatic control systems. The first system is typical, which uses field-oriented control of the magnetic field of the stator; the second system is upgraded, it selects the law of control of the magnetic field depending on the static load. Special attention in the current article is paid to the method of accounting for the saturation of the magnetic system of the motor and the construction of a mathematical and simulation model convenient.

This article substantiates the feasibility of synthesizing more complex automatic control systems are ones with variable structure. The choice of the magnetic field control law in such systems avoids the negative effect of saturation of the machine's magnetic system on the quality of transients. The models presented in the current work can be used in the design of real controlled synchronous electric drives operating under high loads.

**Keywords:** automatic control system, variable structure, saturation of a magnetic system, field-oriented control, Park-Gorev equations, externally excited synchronous motor, electric drive, transients, quality indicators.

Бурное развитие промышленной электроники на рубеже XX и XXI вв. привело к революционным изменениям в области регулируемого электропривода (ЭП), обусловив практически повсеместный переход от ранее доминирующих электромеханических систем (ЭМС) постоянного тока к частотно-регулируемому (ЧР) электроприводу переменного тока [1, 2]. В настоящее время в промышленности наибольшее распространение получил ЧР асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (КАД), серьезную конкуренцию которому в последнее десятилетие начали оказывать ЭМС на основе синхронной машины с постоянными магнитами [3, 4]. Регулируемый ЭП переменного тока на базе указанных машин обладает наиболее благоприятными регулировочными и энергетическими характеристиками в области малой и средней мощности. В области регулируемого ЭП большой мощности (свыше 1 МВт) в отечественной промышленности до сих пор широкое распространение находят ЭМС постоянного тока [5, 6]. Данное обстоятельство объясняется высокими капитальными затратами на техническое перевооружение, хорошими регулировочными свойствами машин постоянного тока, а также большим опытом эксплуатации подобных систем. Несмотря на отмеченные преимущества, при реконструкции старых и разработке новых регулируемых

приводов предпочтение в основном отдается частотно-регулируемым КАД или синхронным двигателям (СД) с электромагнитным (ЭМ) возбуждением. При этом СД с обмоткой возбуждения (ОВ) в составе ЭП большой мощности начинают создавать весомую конкуренцию КАД ввиду того, что они имеют лучшие энергетические характеристики, больший воздушный зазор, а также сопоставимую или меньшую стоимость по сравнению с КАД при мощности свыше 3 МВт [7, 8]. Электромеханические системы с ЧР СД в отечественной и зарубежной практике находят широкое применение в качестве главных ЭП крупноразмольных мельниц, шахтовых подъемных установок, прокатных станов, крупных судов и т. д. [9]. При этом стоит обратить внимание на то, что внедрение данных систем в отечественной промышленности началось в начале XXI в., в то время как в ряде европейских стран их применение берет отсчет с начала восьмидесятых годов прошлого столетия [8]. Запоздалый характер внедрения ЧР СД в тяжелой промышленности и относительно низкий уровень исследовательского интереса по данной тематике соответствующим образом сказывается на сложности анализа подобных систем. Отмеченную проблему усугубляет и тот факт, что подобные ЭМС разработаны и внедрены зарубежными фирмами, которые, как правило, не предоставляют подробной информации об особенностях настройки их систем автоматического управления (САУ) [10].

Помимо запоздалого характера применения ЭМС на основе синхронной машины с ЭМ возбуждением (далее – просто синхронной машины) на практике наблюдается также иной ряд проблем, не позволяющих в полной мере раскрыть их потенциал. Данные трудности связаны прежде всего с особенностями самого объекта управления (ОУ) – синхронной машиной – и способами регулирования ее координат. Наиболее часто при регулировании координат СД применяют полеориентированное управление (ПОУ) с регулированием по магнитному полю статора или реже прямое управление моментом (ПУМ), а синтез самой САУ осуществляется в соответствии с принципом подчиненного регулирования [9 – 13]. Применение данного принципа при построении САУ СД в отличие от той же для двигателя постоянного тока является более сложной задачей ввиду большей нелинейности и многомерности самого ОУ [12]. Использование ПОУ с регулированием по магнитному полю статора является наиболее оптимальным вариантом при нагрузках, не превышающих номинальный ЭМ момент. В противном случае, когда имеет место возникновение перегрузок, вызванных условиями эксплуатации машины, управление с таким законом приводит к ухудшению регулировочных свойств в плане точности и быстродействия, что объясняется насыщением магнитной системы [12]. В данной ситуации более рациональным оказывается применять закон управления по магнитному полю рассеяния, который позволяет существенным образом скомпенсировать влияние насыщения, однако ухудшает энергетические показатели ЭМС. Из перечисленного выше возникает идея выбора и применения одного из указанных законов управления магнитным полем СД в зависимости от нагрузки, с которой работает машина.

Из всего сказанного можно сделать вывод об актуальности проведения исследований в области совершенствования САУ синхронных ЭП, которые в настоящее время являются одними из наиболее перспективных для применения в приложениях, требующих колоссальных затрат мощности. Построение САУ, в которой в зависимости от нагрузки осуществляется переход между законами управления магнитным полем, было осуществлено авторским коллективом ранее в работе [14]. Одной из главных задач статьи является получение математической и имитационной моделей СД, для которого оказывается невозможным принятие допущения о линейности кривой намагничивания во всем диапазоне нагрузок.

В данной статье рассматриваются особенности работы явнополюсного СД при отсутствии дополнительных роторных обмоток, при математическом описании физических процессов которого применяется система относительных единиц (о. е.) Парка. Учет насыщения магнитной системы производится по упрощенной методике, предложенной Горевым А. А., в соответствии с которой принимаются два ключевых допущения: магнитные потоки рассеяния фаз статора не оказывают влияния на процесс насыщения; поперечная составляющая



По характеристике ХХ, представленной на рисунке 1, а, можно вычислить  $i$ -е количество значений коэффициента влияния учета насыщения в точках  $O_1, O_2, \dots, O_n$  посредством вычисления тангенса соответствующих этим точкам углов  $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n$ . На основе множества этих вычислений получаем точки, принадлежащие функциональной зависимости коэффициента учета влияния насыщения от ЭДС рассеяния  $\xi(\bar{E}_\delta)$ , и по ним строим приблизительный график, иллюстрация которого представлена на рисунке 1, б.

Кривую, представленную на рисунке 1, б, для дальнейшего применения при моделировании можно аппроксимировать с помощью полиномиальной функции  $m$ -й степени, имеющей вид:

$$\xi(\bar{E}_\delta) = b_m \bar{E}_\delta^m + b_{m-1} \bar{E}_\delta^{m-1} + \dots + b_1 \bar{E}_\delta + b_0, \quad (3)$$

где  $b_0, b_1, \dots, b_{m-1}$  и  $b_m$  – коэффициенты полинома  $m$ -й степени.

Учет насыщения магнитной системы в математической модели СД, удобной для дальнейшего синтеза с САУ, проводится путем выражения тех или иных переменных, относящихся к замкнутым контурам, лежащим на прямой оси, через величину проекции пространственного вектора потокосцепления в воздушном зазоре на ось  $d$   $\bar{\Psi}_{\delta d}^{\text{sat}}$  [15]:

$$\bar{\Psi}_{\delta d}^{\text{sat}} = \xi(\bar{E}_\delta) \bar{\Psi}_{\delta d} = \xi(\bar{E}_\delta) (\bar{\Psi}_{sd} - \bar{\Psi}_{sid}) = \xi(\bar{E}_\delta) (\bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd} + \bar{I}_f - \bar{L}_{si} \bar{i}_{sd}) = \xi(\bar{E}_\delta) \bar{L}_{\delta d} \bar{i}_{sd} + \xi(\bar{E}_\delta) \bar{I}_f, \quad (4)$$

где  $\bar{\Psi}_{\delta d}$  – проекция пространственного вектора потокосцепления рассеяния на ось  $d$  в идеализированной машине, для которой не производится учет насыщения, о. е.;

$\bar{\Psi}_{sd}$  – проекция пространственного вектора потокосцепления статора на ось  $d$ , о. е.;

$\bar{\Psi}_{sid}$  – проекция пространственного вектора потокосцепления рассеяния в воздушном зазоре от фазной обмотки статора, о. е.;

$\bar{L}_{sd}$  – не зависящий от степени насыщения магнитной системы машины коэффициент самоиндукции обмотки статора на ось  $d$ , о. е.;

$\bar{i}_{sd}$  – проекция пространственного вектора тока статора на ось  $d$ , о. е.;

$\bar{L}_{\delta d}$  – не зависящий от степени насыщения коэффициент самоиндукции «фиктивной» обмотки, которая в соответствии с законом электромагнитной индукции создавала бы в воздушном зазоре эквивалентную ЭДС по оси  $d$ , о. е.;

$\bar{L}_{si}$  – не зависящий от степени насыщения коэффициент самоиндукции «фиктивной» обмотки статора, которая в соответствии с законом электромагнитной индукции создавала бы эквивалентную ЭДС, рассеивающуюся в воздушном зазоре, Гн.

Представим систему уравнений Парка – Горева для синхронной машины величины, входящие в уравнения которой, выражены в о. е., в виде, соответствующем случаю, когда вводится учет насыщения магнитной системы двигателя. Исходную систему уравнений для идеализированной машины можно увидеть в работах [14, 16]. Здесь и далее условимся, что верхний индекс «sat» говорит о том, что переменная или какой-либо параметр зависит от степени насыщения магнитной системы машины. Система уравнений Парка – Горева для описываемого ОУ имеет вид:

$$\begin{cases}
 \bar{u}_{sd}^{\text{sat}} = \bar{R}_s \bar{i}_{sd}^{\text{sat}} + p \frac{\bar{\Psi}_{sd}^{\text{sat}}}{\omega_{\text{эл.б}}} - \bar{\omega}_{\text{эл}}^{\text{sat}} \bar{\Psi}_{sq}^{\text{sat}}; \\
 \bar{u}_{sq} = \bar{R}_s \bar{i}_{sq} + p \frac{\bar{\Psi}_{sq}^{\text{sat}}}{\omega_{\text{эл.б}}} + \bar{\omega}_{\text{эл}}^{\text{sat}} \bar{\Psi}_{sd}^{\text{sat}}; \\
 \bar{U}_f^{\text{sat}} = \bar{I}_f^{\text{sat}} + p T_f \bar{\Psi}_f^{\text{sat}}; \\
 \bar{\Psi}_{sd}^{\text{sat}} = \left[ \xi(\bar{E}_d) \bar{L}_{\delta d} + \bar{L}_{si} \right] \bar{i}_{sd}^{\text{sat}} + \xi(\bar{E}_d) \bar{I}_f^{\text{sat}} = \bar{L}_{sd}^{\text{sat}} \bar{i}_{sd}^{\text{sat}} + \xi(\bar{E}_d) \bar{I}_f^{\text{sat}}; \\
 \bar{\Psi}_{sq}^{\text{sat}} = \bar{L}_{sq} \bar{i}_{sq}; \\
 \bar{\Psi}_f^{\text{sat}} = \left[ \xi(\bar{E}_d) \bar{L}_{\delta d} + \bar{L}_{si} \right] \mu_{df} \bar{i}_{sd}^{\text{sat}} + A^{\text{sat}} \bar{I}_f^{\text{sat}} = \mu_{df} \bar{L}_{sd}^{\text{sat}} \bar{i}_{sd}^{\text{sat}} + A^{\text{sat}} \bar{I}_f^{\text{sat}},
 \end{cases} \quad (5)$$

где  $\bar{u}_{sd}^{\text{sat}}$ ,  $\bar{u}_{sq}$  и  $\bar{U}_f^{\text{sat}}$  – проекции пространственного вектора напряжения статора на оси  $d$  и  $q$ , а также напряжение на зажимах ОВ соответственно, о. е.;

$\bar{R}_s$  – активное сопротивление фазной обмотки статора, о. е.;

$\bar{i}_{sq}$  – проекция пространственного вектора тока статора на ось  $q$ , о. е.;

$p$  – оператор дифференцирования,  $p = \frac{d}{dt}$ ;

$\bar{\Psi}_{sq}^{\text{sat}}$  и  $\bar{\Psi}_f^{\text{sat}}$  – проекция пространственного вектора потокосцепления статора на ось  $q$  и

потокосцепление ОВ соответственно, о. е.;

$\omega_{\text{эл.б}}$  – базисная скорость вращения ротора в электрическом пространстве,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$\bar{\omega}_{\text{эл}}^{\text{sat}}$  – скорость вращения ротора в электрическом пространстве, о. е.;

$T_f$  – электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения,  $T_f = \frac{L_f}{R_f}$ , с;

$L_f$  – коэффициент самоиндукции обмотки возбуждения, Гн;

$R_f$  – активное сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

$\bar{L}_{sd}^{\text{sat}}$  – зависящий от степени насыщения магнитной системы машины коэффициент самоиндукции обмотки статора по оси  $d$ ,  $\bar{L}_{sd}^{\text{sat}} = \xi(\bar{E}_d) \bar{L}_{\delta d} + \bar{L}_{si}$ , о. е.;

$A^{\text{sat}}$  – коэффициент, зависящий от степени насыщения магнитной системы,  $A^{\text{sat}} = 1 + \mu_{df} (\xi - 1)$ ;

$\mu_{df}$  – коэффициент магнитной связи между обмоткой статора по оси  $d$  и обмоткой возбуждения,  $\mu_{df} = \frac{3}{2} \cdot \frac{M_{df}^2}{L_{sd} L_f}$ ;

$M_{df}$  – коэффициент взаимной индукции между обмоткой статора по оси  $d$  и обмоткой возбуждения, Гн.

В дальнейшем с целью минимизации записи формы уравнений будем считать равносильным написание  $\xi(\bar{E}_d)$  и  $\xi$ . Проводя ряд преобразований над системой уравнений

(5), смысл которых сводится к выведению трех регулируемых координат –  $\bar{i}_{sd}^{\text{sat}}$ ,  $\bar{i}_{sq}$  и  $\bar{\Psi}_f^{\text{sat}}$  – через соответствующие им входные переменные  $\bar{u}_{sd}^{\text{sat}}$ ,  $\bar{u}_{sq}$  и  $\bar{U}_f^{\text{sat}}$ , и добавляя к получившейся



системе уравнений выражения для ЭМ момента  $\bar{M}^{sat}$ , скорости ЭП при одномассовой системе  $\bar{\omega}$ , связи между электрической  $\bar{\omega}_{эл}^{sat}$  и физической  $\bar{\omega}^{sat}$  скоростями, а также выражение для коэффициента учета влияния насыщения, полученное с помощью аппроксимации полиномом четвертой степени, получаем конечную математическую модель СД при учете влияния насыщения магнитной системы на его работу в виде следующих систем уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{i}_{sd}^{sat} = \frac{1/R_s}{T_{sd}' p + 1} \left( \bar{u}_{sd}^{sat} - \frac{\xi}{A^{sat}} \cdot \frac{\bar{U}_f^{sat} - \bar{I}_f^{sat}}{T_f \bar{\omega}_{эл.б}^{sat}} + \bar{\omega}_{эл}^{sat} \bar{\Psi}_{sq} \right); \\ \bar{i}_{sq}^{sat} = \frac{1/R_s}{T_{sq}' p + 1} \left( \bar{u}_{sq}^{sat} - \bar{\omega}_{эл}^{sat} \bar{\Psi}_{sd} \right); \\ \bar{I}_f^{sat} = \frac{1}{A^{sat}} \left( \bar{\Psi}_f^{sat} - \mu_{df} \bar{L}_{sd}^{sat} \bar{i}_{sd}^{sat} \right); \\ \bar{\Psi}_{sd}^{sat} = \bar{L}_{sd}^{sat} \bar{i}_{sd}^{sat} + \frac{\xi}{A^{sat}} \bar{\Psi}_f^{sat}; \\ \bar{\Psi}_{sq}^{sat} = \bar{L}_{sq}^{sat} \bar{i}_{sq}^{sat}; \\ \bar{\Psi}_f^{sat} = \frac{1}{A^{sat} T_f p + 1} \left( A^{sat} \bar{U}_f^{sat} + \mu_{df} \bar{L}_{sd}^{sat} \bar{i}_{sd}^{sat} \right); \\ \bar{M}^{sat} = \bar{\Psi}_{sd}^{sat} \bar{i}_{sq}^{sat} - \bar{\Psi}_{sq}^{sat} \bar{i}_{sd}^{sat}; \\ \bar{\omega}_{эл}^{sat} = \bar{\omega}^{sat}; \\ \bar{M}^{sat} - \bar{M}_c^{sat} = T_M p \bar{\omega}^{sat}; \\ \xi = 0,1621 \bar{E}_\delta^4 - 1,0364 \bar{E}_\delta^3 + 0,7677 \bar{E}_\delta^2 - 0,2506 \bar{E}_\delta + 1,0001, \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $T_{sd}'^{sat}$  и  $T_{sq}'^{sat}$  – ЭМ постоянные времени цепей обмоток статора по осям  $d$  и  $q$  соответственно в переходном режиме, с;

$\bar{L}_{sd}^{sat}$  – коэффициент самоиндукции обмотки статора по оси  $d$  в переходном режиме, зависящий от насыщения магнитной системы, о. е.;

$\bar{M}_c^{sat}$  – момент нагрузки (статический момент) на валу машины, о. е.;

$T_M^{sat}$  – электромеханическая постоянная времени ЭП, с.

Для величин  $\bar{L}_{sd}^{sat}$  и  $T_{sd}'^{sat}$  справедливы соответственно следующие выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{L}_{sd}^{sat} = \bar{L}_{sd}^{sat} \left( 1 - \frac{\xi}{A^{sat}} \mu_{df} \right); \\ T_{sd}'^{sat} = \frac{\bar{L}_{sd}^{sat}}{\bar{\omega}_{эл.б}^{sat} R_s}. \end{array} \right. \quad (7)$$

Структурная схема математической модели СД, описываемая уравнениями систем (6) и (7), с учетом влияния степени насыщения магнитной цепи на протекающие при его работе электромагнитные и электромеханические процессы, представлена на рисунке 2.

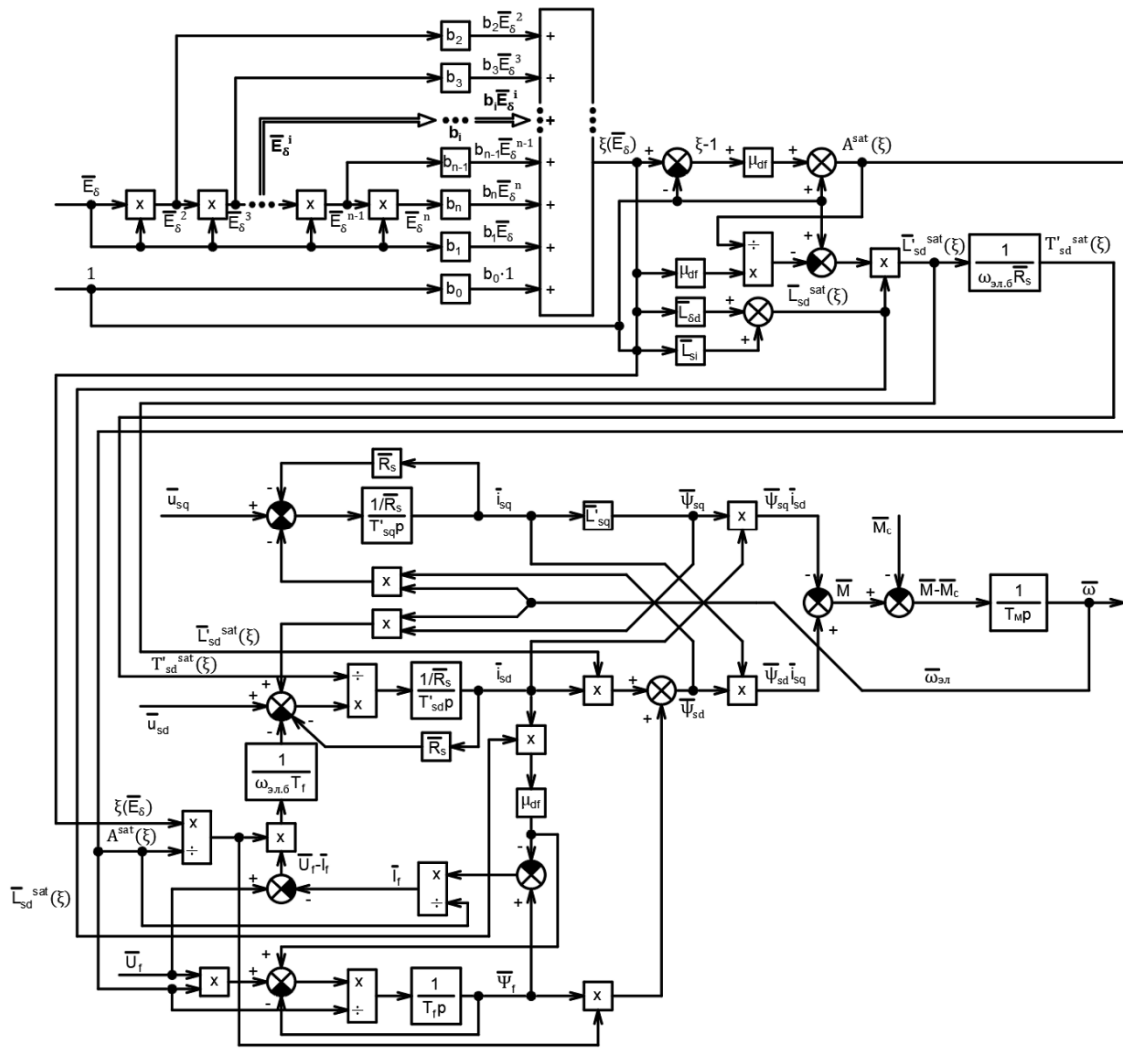


Рисунок 2 – Структурная схема СД с учетом насыщения магнитной системы по основному магнитному потоку

Ниже приводятся передаточные функции (ПФ) всех основных звеньев системы автоматического регулирования (САР) с переменной структурой, которая предназначена для регулирования координат СД, структурная схема которого приведена на рисунке 2:

$$\bar{W}_{\text{пр}q}(p) = \frac{\bar{R}_s T_{\min}}{2T_{\mu i}} \left[ 1 + \frac{(T'_{sq} - T_{\min})p + 1}{T_{\min} p} \right]; \quad (8)$$

$$\bar{W}_{\text{пр}d}(p) = \frac{\bar{R}_s T_{\min}}{2T_{\mu i}} \left[ 1 + \frac{(T'_{sd} - T_{\min})p + 1}{T_{\min} p} \right]; \quad (9)$$

$$\bar{W}_{\text{рнв}}(p) = \frac{T_f p + 1}{2T_{\mu f} p}; \quad (10)$$

$$\bar{W}_{\text{р}c}(p) = \frac{T_m}{K_{\text{н}c} T_{\mu i}} \cdot \frac{K_{\text{н}c} T_{\mu i} p + 1}{a T_{\mu i} p}; \quad (11)$$

$$\bar{W}_{\phi}(p) = \frac{1}{K_{\text{н}c} T_{\mu i} p + 1}; \quad (12)$$

$$\begin{cases} \bar{f}_{kq} = \bar{\omega}_{эл} \bar{\Psi}_{sd}; \\ \bar{f}_{kd} = \bar{\omega}_{эл} \bar{\Psi}_{sq}; \end{cases} \quad (13)$$

$$\bar{i}_{sq} = \frac{\bar{M}}{\bar{\Psi}_s \sqrt{1 - 2 \frac{\bar{L}_{sq}}{\bar{\Psi}_s} \frac{\bar{M}}{\bar{\Psi}_s} \cdot \text{ctg } \alpha + \frac{\bar{L}_{sq}^2}{\bar{\Psi}_s^2} \frac{\bar{M}^2}{\bar{\Psi}_s^2} (1 + \text{ctg}^2 \alpha)}}; \quad (14)$$

$$\bar{i}_{sd} = \frac{\bar{M} \left[ \text{ctg } \alpha - \frac{\bar{L}_{sq}}{\bar{\Psi}_s} \frac{\bar{M}}{\bar{\Psi}_s} (1 + \text{ctg}^2 \alpha) \right]}{\bar{\Psi}_s \sqrt{1 - 2 \frac{\bar{L}_{sq}}{\bar{\Psi}_s} \frac{\bar{M}}{\bar{\Psi}_s} \cdot \text{ctg } \alpha + \frac{\bar{L}_{sq}^2}{\bar{\Psi}_s^2} \frac{\bar{M}^2}{\bar{\Psi}_s^2} (1 + \text{ctg}^2 \alpha)}}; \quad (15)$$

$$\bar{\Psi}_f = \frac{1 - \frac{\bar{L}_{sq} + \bar{L}'_{sd}}{\bar{\Psi}_s^2} \cdot \bar{M} \cdot \text{ctg } \alpha + \frac{\bar{L}_{sq} \bar{L}'_{sd}}{\bar{\Psi}_s^2} \frac{\bar{M}^2}{\bar{\Psi}_s^2} (1 + \text{ctg}^2 \alpha)}{\bar{\Psi}_s \sqrt{1 - 2 \frac{\bar{L}_{sq}}{\bar{\Psi}_s} \frac{\bar{M}}{\bar{\Psi}_s} \cdot \text{ctg } \alpha + \frac{\bar{L}_{sq}^2}{\bar{\Psi}_s^2} \frac{\bar{M}^2}{\bar{\Psi}_s^2} (1 + \text{ctg}^2 \alpha)}}; \quad (16)$$

$$\bar{M}'_c = \bar{M} \left( \frac{T_{кдм} p}{T_{кдм} p + 1} \right) + \bar{M}_c; \quad (17)$$

$$\begin{cases} \text{при } -1 \leq \bar{\omega}_3 \leq 1 \quad \bar{\Psi}_6 = \frac{\bar{E}_s^{\text{орп}}}{|\bar{\omega}_H|} = 1; \\ \text{при } \bar{\omega}_3 > 1 \quad \bar{\Psi}_6 = \frac{\bar{E}_s^{\text{орп}}}{|\bar{\omega}_H|} \approx \frac{1}{|\bar{\omega}_3|}; \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \text{при } |\bar{M}_c| \leq K_\alpha \quad \alpha_3 = \pm \frac{\pi}{2}; \\ \text{при } |\bar{M}_c| > K_\alpha \quad \alpha_3 = \pm \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\bar{L}_{si}^2 \bar{I}_s^2}{\bar{\Psi}_6^2}}}; \end{cases} \quad (19)$$

$$\bar{\Psi}_s = \frac{\bar{\Psi}_6}{\sin |\alpha_3|}, \quad (20)$$

где  $\bar{W}_{pq}(p)$ ,  $\bar{W}_{p'd}(p)$  и  $\bar{W}_{p'v}(p)$  – ПФ регуляторов проекций пространственного вектора тока статора по осям  $q$  и  $d$ , а также регулятора потокосцепления ОВ соответственно, о. е.;

$T_{\min}$  – наперед заданная постоянная времени, меньшая, чем ЭМ постоянные времени обмоток статора, расположенных на осях  $q$  и  $d$ , в переходном режиме, с;

$T_{\mu}$  и  $T_{\psi}$  – малые некомпенсируемые постоянные времени в контурах обмотки статора и обмотки возбуждения соответственно,  $T_{\mu} = 0,8$  мс,  $T_{\psi} = 10$  мс;

$\bar{W}_{p.c}(p)$  и  $\bar{W}_\phi(p)$  – ПФ регулятора скорости и фильтра соответственно, о. е.;

$K_{нс}$  и  $a$  – подстроечные коэффициенты,  $K_{нс} = 16, \dots, 64$ ,  $a = 8, \dots, 16$ ;

$\bar{f}_{kq}$  и  $\bar{f}_{kd}$  – функциональные зависимости, необходимые для компенсации внутренних перекрестных обратных связей (ВПОС) по проекциям пространственного вектора ЭДС вращения на оси  $q$  и  $d$  соответственно, о. е.;

$\alpha$  – угол между пространственными векторами потокосцепления и тока статора;

$\bar{M}_c$  – измеренное косвенным способом значение статического момента, о. е.;

$T_{кдм}$  – малая постоянная времени реального дифференцирующего звена, необходимого для косвенной оценки величины статического момента,  $0,1 \leq T_{кдм} \leq 1$ , мс;

$\bar{\omega}_3$  – величина задания на контур скорости, о. е.;

$\bar{\Psi}_6$  – потокосцепление, принимаемое за базовое, о. е.;

$\bar{E}_s^{орп}$  – величина ограничения ЭДС вращения, в данном случае  $\bar{E}_s^{орп} = 1$  о. е.;

$K_\alpha$  – кратность момента, при которой происходит смена закона управления магнитным полем машины,  $0,9 \leq K_\alpha \leq 2$ ;

$\alpha_3$  – задание угла между пространственными векторами потокосцепления и тока статора, с помощью которого формируется тот или иной закон управления магнитным полем машины.

В таблице 1 представлено описание функционального назначения различных звеньев САР, выражения которых представлены формулами (8) – (20).

Таблица 1 – Функциональное назначение различных звеньев системы автоуправления

Порядковые номера формул	Назначение	Углубленная детализация назначения
8, 9	ПИ-регуляторы проекций пространственного вектора тока статора	Контур проекций тока статора настраиваются на модульный оптимум (МО)
10	ПИ-регулятор потокосцепления ОБ	Настраивается на МО
11	ПИ-регулятор скорости ЭП	Внешний контур системы настраивается на симметричный оптимум (СО)
12	Фильтр на входе системы	Компенсация форсирующего звена регулятора скорости при настройке на СО
13	Блоки компенсации ВПОС	–
14 – 16	Зависимости, составляющие блоки нелинейности (БН1 – БН3)	Необходимы для создания многомерного контура момента (МКМ)
17	Блок косвенного вычисления момента нагрузки	Величина момента нагрузки необходима для выбора закона управления магнитным полем
18	Блок формирования базового потокосцепления	Данные блоки являются ключевыми в САР и выполняют две функции: осуществляют выбор того или иного закона управления полем; позволяют осуществить двухзонное регулирование скорости (условия системы уравнений (8) – (20))
19	Блок формирования угла между пространственными векторами потокосцепления и тока статора	
20	Блок формирования потокосцепления статора	
Последние три уравнения системы (5)	Формирование косвенных вычислений координат ЭП, участвующих в каналах обратной связи (ОС)	Необходимы для обеспечения ОС по потокосцеплению ОБ и по проекциям пространственного вектора ЭДС вращения

Уравнениями (8) – (20) описываются основные блоки САР, отвечающие за адекватное функционирование ЭП. Однако данные уравнения не отражают полной математической модели САУ, в которую входят также выражения для преобразователей координат (ПК1 и ПК2), позволяющие осуществлять переход между трехфазной статорной системой координат АВС и роторной системой координат  $dq\theta$ , выражения блоков ограничения координат и задатчика интенсивности. Данные звенья являются типовыми для подобного рода систем, а с методикой их построения можно ознакомиться, к примеру, в работе [17].

На рисунках 3 и 4 соответственно изображены имитационная модель синхронного ЭП, построенная на основе математической модели, состоящий из систем уравнений и выражений (6) – (20), а также переходные процессы (ПП), полученные с помощью данной модели при различных заданиях на скорость ЭП и при приложении разных статических моментов. Первая часть (при просмотре сверху вниз) ПП, представленных на рисунках 4, а и 4, б, соответствует САУ с переменной структурой, в которой переключение между законами управления магнитным полем происходит при кратности момента, равной 0,9, вторая часть (рисунки 4, б и 4, з) – САУ, в которой постоянно действует закон управления магнитным полем статора.

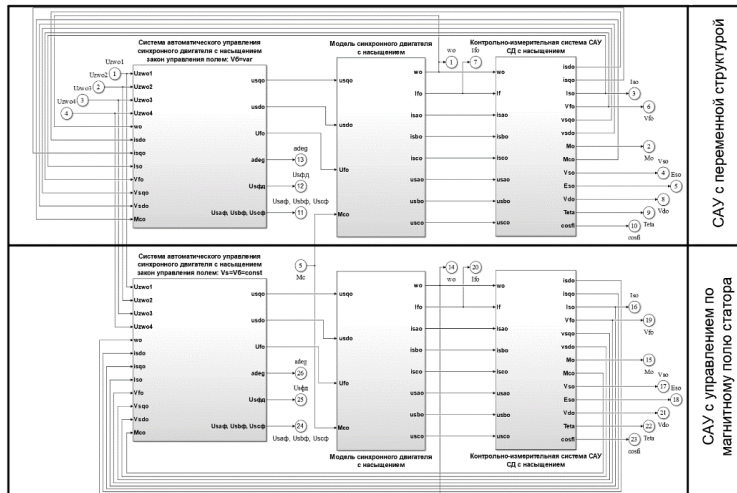


Рисунок 3 – Имитационная модель синхронных ЭП, один из которых управляется САУ с переменной структурой, а другой – САУ с ПОУ по магнитному полю статора

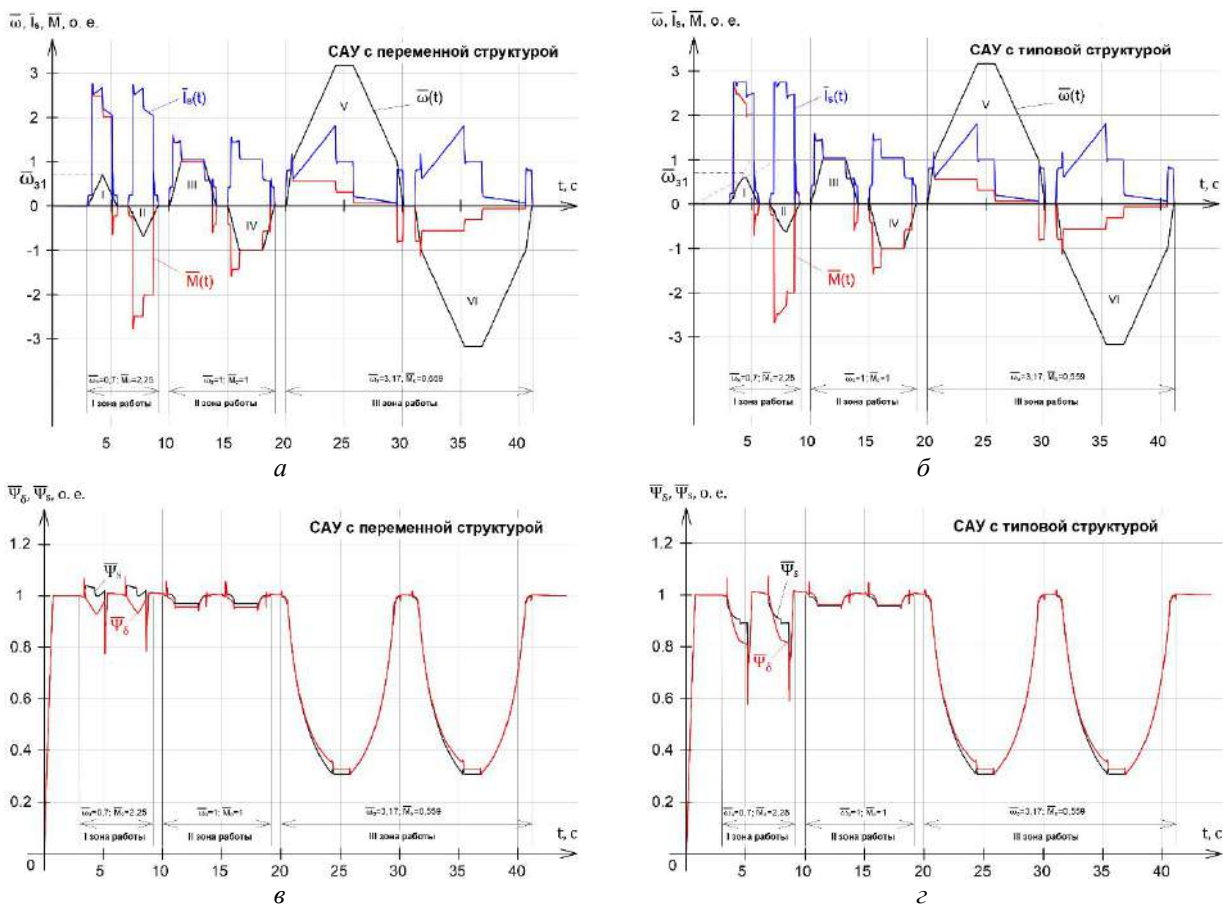


Рисунок 4 – Графики ПП по основным координатам ЭП в САУ с переменной (а) и типовой (б) структурами и по координатам потокосцеплений статора и рассеяния в САУ с переменной (в) и типовой (з) структурами

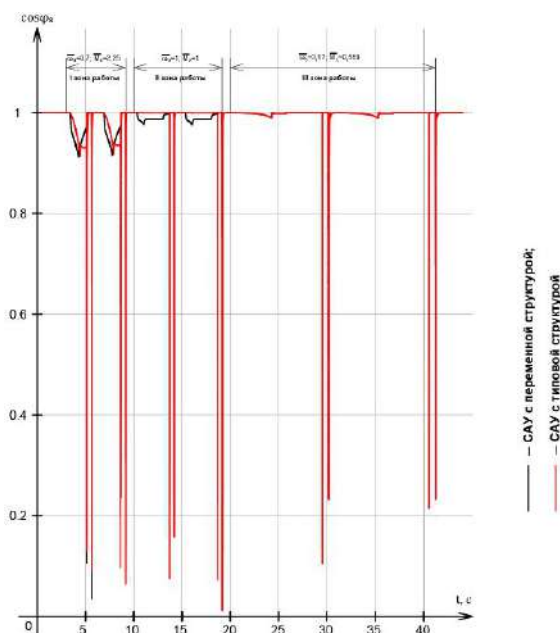


Рисунок 5 – Сигнал коэффициента мощности при применении различных САУ

Из кривых ПП по координатам скорости, ЭМ момента и тока, представленных на рисунках 4, а и 4, б видно, что в САУ с изменяемым законом управления магнитным полем сигнал скорости остается практически линейным во всем диапазоне рабочих нагрузок, в то время как в САУ с управлением по магнитному полю статора при максимальной рабочей нагрузке ЭП (2,25 кратности номинального момента) происходит скругление сигнала скорости ввиду насыщения магнитной системы, которое не может быть скомпенсировано как по цепи ротора, так и по цепи статора (мгновенное значение тока статора при такой нагрузке находится в постоянном ограничении). Помимо кривых ПП по основным координатам ЭП приведем также графики ПП, которые отражают поведение коэффициента мощности при работе той или иной САУ. Данные графики изображены на рисунке 5.

В таблице 2 приводится сравнение динамических и статических показателей качества ПП по скорости, току статора и ЭМ моменту  $M$ , а также энергетических характеристик, наблюдаемых при работе обеих САУ при учете насыщения магнитной системы рабочей машины.

Таблица 2 – Показатели качества, полученные путем обработки кривых переходных процессов

Вид САУ	Зона работы	Показатели качества							Коэффициент мощности $\cos \varphi_s$
		время ПП*, с	перерегулирование, %			статическая ошибка, %			
			$\bar{\omega}$	$\bar{\omega}$	$\bar{I}_s$	$\bar{M}$	$\bar{\omega}$	$\bar{I}_s$	
С переменной структурой	I	–	–	10,34	10,98	1,76	–	–	–
	II	1,0335	0	7,58	12,19	0	4,41	0	0,9873
	III	4,2127	0	–	–	0	0,59	0	0,9988
Типовая	I	–	–	10,44	7,02	13,27	–	–	–
	II	1,0333	0	10,77	11,32	0	4,38	0	0,9994
	III	4,2127	0	–	–	0	0,59	0	0,9988

\* В рамках текущей работы под временем переходного процесса понимается такое время, за которое сигнал той или иной величины входит в коридор с отклонением от требуемого установившегося значения  $\pm 2\%$

По данным, представленным в таблице 2, и по графикам ПП, изображенным на рисунке 4, видно, что САУ с переменной структурой имеет явное преимущество при возникновении нагрузок, которые оказываются значительно выше номинального ЭМ момента. Коэффициент мощности при возникновении перегрузки в САУ с переменной структурой оказывается ниже за счет управления по магнитному полю рассеяния, однако такое управление позволяет сохранить равноускоренное движение ротора синхронного ЭП, что не достигается при управлении по магнитному полю статора. В области номинальной нагрузки обе САУ имеют приблизительно сходные показатели качества регулирования, однако при управлении по магнитному полю рассеяния наблюдается меньший коэффициент мощности, что делает регулирование координат машины в окрестности такой нагрузки нерациональным.

Сравнительный анализ графиков ПП координат синхронного ЭП, полученных при использовании двух различных САУ – с переменной и типовой структурой, подтверждает целесообразность изменения закона полеориентированного управления машиной в зависимости от нагрузки, прикладываемой к валу. Предлагаемая в работе [14] система

автоуправления с переменной структурой, результаты исследования работы которой с помощью имитационной модели проведено в настоящей статье, может быть использована при построении реальных регулируемых синхронных ЭП, которые в настоящее время находят широкое применение в различных отраслях тяжелой промышленности.

## Список литературы

1. Wu B., Narimani M. High-Power Converters and AC Drives – 2<sup>nd</sup> ed., *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc : Published by John Wiley & Sons, Inc*, 2017, 480 p.
2. Чернышев, А. Ю. Электропривод переменного тока / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев. – Томск : Томской политехнический университет, 2011. – 213 с. – Текст : непосредственный.
3. Sarac, V., & Iliev, D. (2017). Synchronous Motor of Permanent Magnet compared to Asynchronous Induction Motor. *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 65(7), 51-58, <https://eprints.ugd.edu.mk/id/eprint/18973>.
4. Soreshjani, M. H., & Sadoughi, A. (2014). Conceptual comparison of line-start permanent magnet synchronous and induction machines for line-fed of different conditions. *Journal of World's Electrical Engineering Technology*, 3(1), 26-36.
5. Ягопольский, А. Г. Особенности применения современных электроприводов в оборудовании прокатных комплексов / А. Г. Ягопольский, Т. Ю. Комкова. – Текст : непосредственный // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – С. 138. – EDN UHWYRT.
6. Имитационное моделирование системы автоуправления с переменной структурой для векторного управления синхронным электродвигателем классической конструкции / В. Ю. Островляничик, В. А. Кубарев, Н. С. Зайцев, Е. С. Кузнецова. – Текст : непосредственный // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022 : труды всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Новокузнецк, 15–16 декабря 2022 г. / Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2022. – С. 586–592. – EDN NHKDYQ.
7. Основы автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский. – Москва : Энергия, 1974. – 568 с. – Текст : непосредственный.
8. Фединцев, В. Е. Электрооборудование цехов ОМД. Часть 2. Электропривод прокатных станов и вспомогательных механизмов цехов ОМД / В. Е. Фединцев. – Москва : Московский институт стали и сплавов, 2005. – 119 с. – Текст : непосредственный.
9. Finch, J. W., & Giaouris, D. (2008). Controlled AC electrical drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(2), 481-491, <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.911209>.
10. Гасияров, В. Р. Математическое описание главного электропривода толстолистого стана 5000 горячей прокатки / В. Р. Гасияров, Е. А. Маклакова. – Текст : непосредственный // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – № 3. – С. 62–66. – EDN UHYQFH.
11. Вейнгер, А. М. Регулируемый синхронный электропривод / А. М. Вейнгер. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с. – Текст : непосредственный.
12. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с. – Текст : непосредственный.
13. Гасияров, В. Р. Совершенствование электротехнических систем реверсивной клетки толстолистого прокатного стана : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гасияров Вадим Рашитович ; Южно-Уральский государственный университет (НИУ). – Челябинск, 2020. – 359 с. – Текст : непосредственный. – EDN PBERMA.
14. Способ построения системы автоуправления переменной структуры для частотно-регулируемого синхронного электропривода / В. Ю. Островляничик, Н. С. Зайцев, В. А. Кубарев

[и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 614–624. – EDN TEJITB.

15. Меркурьев, Г. В. Устойчивость энергосистем / Г. В. Меркурьев, Ю. М. Шаргин. – Санкт-Петербург : НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – Книга 1. – 369 с. – Текст : непосредственный.

16. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – Москва : Академия, 2006. – 265 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Wu B., Narimani M. High-Power Converters and AC Drives – 2<sup>nd</sup> ed., *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc : Published by John Wiley & Sons, Inc*, 2017, 480 p.

2. Chernyshov A.Yu., Dement'ev Yu.N., Chernyshev I.A. *Elektroprivod peremennogo toka* [Alternating current electric drive]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2011, 213 p. (In Russian).

3. Sarac, V., & Iliev, D. (2017). Synchronous Motor of Permanent Magnet compared to Asynchronous Induction Motor. *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 65(7), 51-58, <https://eprints.ugd.edu.mk/id/eprint/18973>.

4. Soreshjani, M. H., & Sadoughi, A. (2014). Conceptual comparison of line-start permanent magnet synchronous and induction machines for line-fed of different conditions. *Journal of World's Electrical Engineering Technology*, 3(1), 26-36.

5. Yagopolskiy A.G., Komkova T.Yu. Features of application of modern electrical drives in rolling mills equipment. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia – Modern problems of science and education*, 2015, no. 2-1, pp. 138. EDN UHWYRT. (In Russian).

6. Ostrovlyanchik V.Yu, Kubarev V.A., Zaitsev N.S., Kuznetsova E.S. [Simulation of an auto-control system with a variable structure for vector control of a synchronous electric motor of classical design]. *Sistemy avtomatizatsii (v obrazovanii, nauke i proizvodstve) AS'2022 : trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Automation systems (in education, science, and manufacturing) AS'2022 : proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)]. Novokuznetsk, 2022, pp. 586-592. EDN NHKDYQ. (In Russian).

7. Chilikin M.G., Sokolov M.M., Terekhov V.M., Shinyanskiy A.V. *Osnovy avtomatizirovannogo elektroprivoda* [Fundamentals of an automated electric drive]. Moscow, Energiia Publ., 1974, 568 p. (In Russian).

8. Fedintsev V.E. *Elektrooborudovanie tsekhov OMD. Chast' 2. Elektroprivod prokatnykh stanov i vspomogatel'nykh mekhanizmov tsekhov OMD* [Electrical equipment of metalworking workshops by pressure. Part 2. Electric drive of rolling mills and auxiliary mechanisms of metalworking workshops by pressure]. Moscow, Moscow Institute of Steel and Alloys Publ., 2005, 119 p. (In Russian).

9. Finch, J. W., & Giaouris, D. (2008). Controlled AC electrical drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(2), 481-491, <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.911209>.

10. Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Mathematical description of main electric drive of hot plate mill 5000. *Elektrotehnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal – Electrical Engineering: online electronic scientific journal*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 62-66. EDN UHYQFH. (In Russian).

11. Veinger A.M. *Reguliruemiy sinkhronnyy elektroprivod* [Adjustable synchronous electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 224 p. (In Russian).

12. Slezhanovskii O. V., Datskovskii L.Kh. Kuznetsov I.S., Lebedev E.D., Tarasenko L.M. *Sistemy podchinennogo regulirovaniia elektroprivodov peremennogo toka s ventil'nyimi preobrazovateliami* [Subordinate control systems for AC electric drives with valve converters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 256 p. (In Russian).

13. Gasiyarov V.R. *Sovershenstvovanie elektrotekhnicheskikh sistem reversivnoi kleti tolstolistovogo prokatnogo stana* (Improvement of electrical engineering systems of the reversible



cage of a thick-sheet rolling mill). Grand doctor's thesis, Chelyabinsk, South Ural State University (National Research University), 2020, 359 p. EDN PBERMA. (In Russian).

14. Ostrovlyanchik V.Yu., Zaitsev N.S., Kubarev V.A., Kuznetsova E.S., Modzelevskiy D.E. The method for constructing an automatic control system of variable structure for a frequency-controlled synchronous electric motor. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiia of Tula State University. Technical sciences*, 2023, no. 4, pp. 614-624. EDN TEJJB. (In Russian).

15. Merkur'ev G.V., Shargin Yu.M. *Ustoichivost' energosistem. Kniga 1* [Sustainability of energy systems. Book 1]. St. Petersburg, Non-governmental educational institution "Energy Personnel Training Center" Publ., 2006, 369 p. (In Russian).

16. Sokolovskii G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Alternating current electric drives with frequency control]. Moscow, Akademiia Publ., 2006, 265 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Зайцев Никита Сергеевич**

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Кирова ул., д. 42, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация.

Аспирант кафедры автоматизации и информационных систем, СибГИУ.

Тел.: +7 (951) 584-01-18.

E-mail: ZaiTsevNiki@yandex.ru

### **Кубарев Василий Анатольевич**

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Кирова ул., д. 42, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники, электропривода и промышленной электроники, СибГИУ.

Тел.: +7 (905) 966-55-71.

E-mail: kva2003@list.ru

### **Кузнецова Елена Степановна**

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Кирова ул., д. 42, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, СибГИУ.

Тел.: +7 (906) 927-20-02.

E-mail: kuzlena00@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Зайцев, Н. С. Качество регулирования в системах автоуправления синхронного электропривода при учете насыщения магнитной системы машины / Н. С. Зайцев, В. А. Кубарев, Е. С. Кузнецова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 138 – 152.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Zaitsev Nikita Sergeevich**

Siberian State Industrial University (SibSIU).

42, Kirova st., Novokuznetsk, 654007, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department "Automation and information systems", SibSIU.

Phone: +7 (951) 584-01-18.

E-mail: ZaiTsevNiki@yandex.ru

### **Kubarev Vasilii Anatolevich**

Siberian State Industrial University (SibSIU).

42, Kirova st., Novokuznetsk, 654007, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor, head of department "Electrical engineering, electric drive and industrial electronics", SibSIU.

Phone: +7 (905) 966-55-71.

E-mail: kva2003@list.ru

### **Kuznetsova Elena Stepanovna**

Siberian State Industrial University (SibSIU).

42, Kirova st., Novokuznetsk, 654007, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of department "Electrical engineering, electric drive and industrial electronics", SibSIU.

Phone: +7 (906) 927-20-02.

E-mail: kuzlena00@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Zaitsev N.S., Kubarev V.A., Kuznetsova E.S. The quality of regulation in the automatic control system of a synchronous electric drive, taking into account the saturation of the magnetic system of the machine. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 3 (63), pp. 138-152. (In Russian).

## Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала, соответствующим специальностям Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118:

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;

2.9.4. Управление процессами перевозок;

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;

2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника;

2.4.5. Энергетические системы и комплексы;

2.4.3. Электроэнергетика;

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы;

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционного совета журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru).

## Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

### В редакцию журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.

2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.

3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).

4. Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.

5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех соавторов статьи (образец прилагается).

6. Согласие на обработку персональных данных от каждого автора (соавтора) статьи (образец прилагается).

В тексте статьи обязательно указываются тематический раздел журнала, в который подается статья, и научная специальность, которой эта статья соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию авторов (место работы или учебы), заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова на русском и английском языках, текст статьи, список литературы в русском и латинском алфавитах, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Текст статьи оформляется в соответствии с установленным образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

### Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть: оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычной» (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

### Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы – формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей – 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста – Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (·);

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы, такие как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисовочные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт; необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»); межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см; автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить; инициалы и фамилии всегда должны находиться на одной и той же строке; каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде; рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следует список использованной литературы на русском языке и в латинском алфавите; ссылки на литературу в тексте статьи указываются арабскими цифрами в квадратных скобках; список использованной литературы на русском языке имеет заголовок *Список литературы* и оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018; список использованной литературы в латинском алфавите имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с установленным образцом; при публикации научной статьи на русском или английском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках.

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотации и списка литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также необходимо согласовывать с редакцией. Иллюстрации, схемы и таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации в разных выпусках журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста.

Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов статей, необходимо обращаться в редакцию журнала.

*Научное издание*

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies»

№ 3 (63) 2025

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором), регистрационный номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в интернет-каталоге «Пресса по подписке» ([www.akc.ru](http://www.akc.ru)) – E28002.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

С июля 2011 г. журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издание выходит с периодичностью 4 выпуска в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Технический редактор – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии:  
644046, Омская область, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;  
тел.: +7 (3812) 31-05-54;  
e-mail: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

Подписано в печать 26.12.2025.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 29.12.2025.

